

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«Ухтинский государственный технический университет»**  
**(УГТУ)**



# **Современные проблемы развития Европейского Севера**

Материалы  
Всероссийской научно-практической конференции

(8-9 июня 2023 года)

Ухта  
УГТУ  
2023

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

**Современные проблемы развития Европейского Севера**

МАТЕРИАЛЫ ВСЕРОССИЙСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ  
(8–9 июня 2023 года)

УДК [5+6](061.3)

ББК 94 я5

К 65

**К 65 Конференция Всероссийская научно-практическая (8–9 июня 2023 г.; Ухта).**

Современные проблемы развития Европейского Севера : материалы конференции / под редакцией Р. В. Агинеи. – Ухта : Изд-во УГТУ, 2023. – 196 с. : ил. – Текст : электронный.

**ISBN 978-5-6049231-3-9**

В сборнике представлены доклады Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы развития Европейского Севера», проведённой Ухтинским государственным техническим университетом 8–9 июня 2023 года.

Рассмотрены актуальные проблемы, отражающие широкий спектр научных направлений. В сборнике представлены доклады по следующим темам: проблемы, связанные с эксплуатацией и обслуживанием, перспективами развития и внедрения результатов фундаментальных и прикладных исследований в области транспортно-технологических машин и комплексов; проблемы в области механики деформируемого твёрдого тела, физики конденсированного состояния, а также способы решения инженерно-прикладных задач с применением основных законов механики; актуальные вопросы архитектурной реконструкции городов и строительных технологий; проблемы создания и эксплуатации объектов электроэнергетических сетей и обеспечения надёжности работы и повышения эффективности электроустановок, технико-технологических решений по метрологическому обеспечению производственных процессов; вопросы обеспечения комплексной безопасности, геодезии, бережного природопользования.

УДК [5+6](061.3)

ББК 94 я5

Редакционная коллегия: д-р техн. наук, профессор Р. В. Агинеи (гл. редактор); канд. техн. наук Е. В. Тетеревлёва; канд. техн. наук В.Л. Савич; канд. техн. наук Т. В. Грунскои; доцент, канд. техн. наук М. В. Коломинова; канд. техн. наук И. Д. Киборт; доцент, канд. техн. наук М. А. Засовская (научный секретарь); А. А. Матросова (секретарь).

Материалы, помещённые в настоящий сборник, даны в авторской редакции с минимальными правками.

Техническое редактирование и компьютерная вёрстка: В. В. Конева.

© Ухтинский государственный технический университет, 2023

**ISBN 978-5-6049231-3-9**

План 2023 г., позиция 004(н).

Компьютерный набор. Гарнитура Times New Roman.

Уч.-изд. л. 10,3. Заказ № 381.

Ухтинский государственный технический университет.  
169300, Республика Коми, г. Ухта, ул. Первомайская, д. 13

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И МЕТРОЛОГИЯ .....</b>	<b>7</b>
Метод поверки электроизмерительных приборов переменного тока специальными сигналами с кусочно-ступенчатой аппроксимацией <i>Базарова А. М., Круслякова Е. С. ....</i>	<i>7</i>
Оценки возмущений фазово-эквивалентных матричных потенциалов / Estimates of the phase-equivalent matrix potentials' perturbations <i>Семяшкіна Е. И. ....</i>	<i>9</i>
Электроснабжение слесарного участка механического цеха машиностроительного завода <i>Вайник К. В.</i> <i>Научный руководитель – Старцев А. Э. ....</i>	<i>12</i>
Реконструкция системы электроснабжения КЦ-1 КС-21 «ШЕКСНА» <i>Полетаева С. Н.</i> <i>Научный руководитель – Тетеревлева Е. В. ....</i>	<i>14</i>
Резонансные явления в шаговых двигателях <i>Старцев А. Э., Уляшев А. Е., Полетаев С. В. ....</i>	<i>16</i>
Обоснование основных технических этапов реконструкции ТП № 605 и системы электроснабжения Сосногорского ГПЗ <i>Чукилев А. Е.</i> <i>Научный руководитель - Старцев А. Э. ....</i>	<i>19</i>
Реконструкция систем электроснабжения подстанции «Советская» города Воркуты <i>Карабанов Б. Д.</i> <i>Научный руководитель – Полетаев С. В. ....</i>	<i>21</i>
Технологии повышения надежности работы воздушных линий электропередач 6-35 кВ <i>Тетеревлева Е. В. ....</i>	<i>25</i>
Особенности управления электроприводами компрессорных установок при нарушениях в системах электроснабжения <i>Тетеревлева Е. В., Отев К. С. ....</i>	<i>27</i>
Использование автономных источников энергии блочно-модульного типа на предприятиях нефтегазовой отрасли <i>Агеев А. Э.</i> <i>Научный руководитель - Тетеревлева Е. В. ....</i>	<i>30</i>
Влияние гармоник тока и напряжения на системы электроснабжения <i>Андреев М. А., Андреев Д. И. ....</i>	<i>34</i>
Цифровая подстанция <i>Замилов А. А. ....</i>	<i>39</i>
Проектирование электроснабжения деревообрабатывающего цеха города Луза <i>Каргин К. А.</i> <i>Научный руководитель – Полетаев С. В. ....</i>	<i>43</i>
Реконструкция станции цифрового наземного телевиденья Нижний Одес <i>Кокін Р. О.</i> <i>Научный руководитель – Старцев А. Э. ....</i>	<i>46</i>
Реконструкция электроснабжения потребителей ППМН <i>Кочкин Н. В. ....</i>	<i>48</i>
Эффективность внедрение автоматизированного рабочего места поверителя <i>Лиджиев Б. С., Отев К. С., Мучкинова Л. И. ....</i>	<i>50</i>
Автоматизация обработки результатов измерений при проведении поверки компараторов на примере ФБУ «Коми ЦСМ» <i>Тропин Д. И., Отев К. С. ....</i>	<i>53</i>
Вопросы электромагнитной совместимости преобразователей частоты <i>Петров М. В. ....</i>	<i>56</i>

Обеспечение надёжности работы воздушных линий электропередачи в условиях гололёдных нагрузок <i>Романовский С. Е.</i> .....	59
О модернизации электропривода дробилки <i>Моторина Н. П.</i> .....	64
Анализ инерционных свойств бурильной колонны представленной в виде двухмассовой структуры <i>Рыков П. Е.</i> .....	67
Реконструкция системы электроснабжения подстанции № 341 г. Ильинск <i>Телицын Е. И.</i> <i>Научный руководитель – Полемаев С. В.</i> .....	70
Разработка схемы автоматизации пуска электродвигателя вентилятора местного проветривания <i>Щетинин Е. В.</i> .....	74
<b>СЕКЦИЯ 2. МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ</b> .....	<b>78</b>
Теоретические основы вероятностного моделирования в прикладных задачах механики <i>Габова М. Н., Мужикова А. В., Савич В. Л.</i> .....	78
Деформация гибкого стержня из никелида титана при нагреве под постоянной механической нагрузкой <i>Богданов Н. П., Демина М. Ю.</i> .....	83
Модель автоволнового процесса деформации для материалов с обратимыми мартенситными превращениями на основе структурно-аналитической мезомеханики <i>Малинин В. Г<sup>1</sup>, Малинина Н. А., Малинин Г. В.</i> .....	87
Особенности разрушения нитридокремниевой керамики при пропорциональных траекториях нагружения в пространстве напряжений <i>Малинина Н. А., Малинин В. Г., Малинин В. В.</i> .....	90
Структурно-аналитический критерий разрушения для стальных тел с концентраторами напряжений <i>Малинин В. В., Малинин Г. В.</i> .....	95
Тензорные характеристики собственного магнитного поля рассеивания, как инструмент прочностной оценки элементов конструкций <i>Малинин В. Г., Малинин В. В., Савич В. Л., Димов А. А., Отев К. С.</i> .....	97
Аналитический расчет диаграмм деформации на основе структурно-аналитической концепции физической мезомеханики <i>Малинин В. Г., Малинина Н. А., Савич В. Л., Отев К. С.</i> .....	99
<b>СЕКЦИЯ 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ТЕРРИТОРИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ</b> .....	<b>103</b>
Обеспечение защиты от коррозии производственных объектов в нефтегазовой отрасли <i>Григорьева Т. А.</i> .....	103
Квантово-химическое моделирование процессов взаимодействия загрязняющих веществ с парами воды на нефтяных и газовых месторождениях <i>Старинец М. В., Засовская М. А.</i> .....	106
Газогидраты и методы борьбы с ними при эксплуатации газовых скважин <i>Старинец М. В., Засовская М. А.</i> .....	110
Исследование источников тепловыделений, формирующий нагревающий микроклимат в уклонных блоках нефтешахт <i>Грунсконой Т. В., Белкин И. А.</i> .....	114
Синтез и строение магнийсодержащих титанатов висмута <i>Пискайкина М. М.</i> .....	117
Внедрение поведенческого аудита безопасности в лабораторный практикум «Борьба за жизнь» <i>Поликарпова М. В., Тихомирова К. С.</i> .....	119

Оптимизация электролизной подготовки рабочего раствора в цикле регенерации магнетита <i>Ивенина И. В., Смирнов Ю. Г.</i> .....	122
Комплексная характеристика населения МО ГО «Сосногорск» <i>Кожевина К. Е.</i> <i>Научный руководитель – Лазарева В. Г.</i> .....	125
Определение термина «чрезвычайная ситуация» сквозь призму философских категорий <i>Соходон Г. В.</i> .....	130
<b>СЕКЦИЯ 4. ТЕХНОЛОГИЯ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ .....</b>	<b>133</b>
К вопросу о применении компьютерных программ в лесном и ландшафтном проектировании <i>Коломинова М. В.</i> .....	133
Логистика в лесном хозяйстве и лесной промышленности <i>Чемшикова Ю. М., Михайленко Е. В., Тимохова О. М.</i> .....	136
Анализ теплового режим гидравлического привода трелевочного трактора <i>Тимохов Р. С., Тимохова О. М., Шакирзянов Д. И.</i> .....	138
Анализ методов экстракции нанофибрилл из целлюлозных волокон <i>Андреев С. А.</i> <i>Научные руководители - Тимохова О. М., Тимохов Р. С.</i> .....	142
Производство товаров народного потребления из низкокачественной древесины <i>Бородулин А. М.</i> .....	145
Особенности строительства зимних лесовозных автомобильных дорог <i>Бурмистрова О. Н., Пильник Ю. Н.</i> .....	146
Новые технологии строительства автомобильных дорог <i>Выборов В. А.</i> <i>Научный руководитель - Бурмистрова О. Н.</i> .....	149
Лесозаготовительная машина с автономным отслеживанием <i>Вычерова Н. Р., Тимохова О. М.</i> .....	151
Лесопильные процессы с использованием ленточнопильных станков <i>Горбиков В. В.</i> .....	154
Разработка математической модели деформации снежного покрова на лесной дороге <i>Меньшиков С. В., Бурмистрова О. Н., Ужицкий Е. А.</i> .....	155
Проблемы применения деревьев хвойных пород в озеленении городов <i>Михайленко Е. В.</i> .....	162
Оценка воздействия ходовой части лесных машин на почву <i>Черевань В. С.</i> .....	165
<b>СЕКЦИЯ 5. АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО .....</b>	<b>169</b>
Особенности размещения аэрационных проемов и их влияние на формирование тепловоздушной среды в помещении со значительными тепловыделениями <i>Булгаков В. Ю., Пухкал В. А.</i> .....	169
Положительные факторы использования КДО в малой теплоэнергетике <i>Иванова Е. С.</i> .....	172
Модульное композиционное моделирование как основа архитектурного проектирования <i>Миронюк А. В.</i> .....	176
Применения модели при проектирование свайных фундаментов по предельным деформациям <i>Девальтовский Е. Э., Скутина Е. В.</i> .....	179
Особенности взаимодействия с грунтом одиночной и кустовой свай <i>Девальтовский Е. Э., Скутина Е. В.</i> .....	182
Совершенствование воздушного режима при производстве фармацевтической продукции на примере производства твердых лекарственных форм / Improving the air regime in production pharmaceutical products on the example of production solid dosage forms <i>Ильин Е. А.</i> <i>Научный руководитель – Уляшева В. М.</i> .....	185

Численное моделирование системы вентиляции помещений сварочных цехов больших объемов <i>Пономарев Н. С., Джин Хевэй, Сон Ян Пин</i> .....	188
Сравнительный анализ конструкций теплоутилизатора с тепловыми трубами при помощи Ansys Fluent / Comparative analysis of heat exchanger designs with heat pipes using Ansys Fluent <i>Тимофеев А. В.</i> <i>Научный руководитель – Яковлев В. А.</i> .....	191
АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ.....	196

## СЕКЦИЯ 1. ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА И МЕТРОЛОГИЯ

УДК 621.317.312

### Метод поверки электроизмерительных приборов переменного тока специальными сигналами с кусочно-ступенчатой аппроксимацией

Базарова А. М., Круслякова Е. С.

*Ухтинский государственный университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье описаны особенности использования метода поверки электроизмерительных приборов переменного тока специальными сигналами с кусочно-ступенчатой аппроксимацией.

**Ключевые слова:** поверка, прибор, ток, сигнал, ошибка, точность.

**Annotation.** The article describes the features of using the method of verification of electrical measuring instruments of alternating current with special signals with a piecewise-step approximation.

**Keywords:** verification, device, current, signal, error, accuracy.

Одной из важнейших проблем обеспечения качества и конкурентоспособности продукции, товаров, услуг является разработка и использование средств измерений для установления их оптимальных потребительских свойств, лучших условий хранения и эксплуатации. В свою очередь, пригодность средств измерительной техники (СИТ) к применению по назначению определяется соответствием их метрологических характеристик установленным нормам.

Согласно ISO 10012:2003, метрологическое подтверждение СИТ – это совокупность операций, необходимых для гарантирования того, что измерительное оборудование отвечает установленным метрологическим требованиям относительно его использования по назначению [1]. Эта характеристика отражает степень доверия к полученным результатам поверки СИТ. На нее влияет большое количество факторов, наиболее существенными из которых является точность и полнота контроля поверочных параметров, временные показатели поверки, надежность поверочных и эталонных СИТ, точность задания допуска поверочной характеристики, методика поверки, способы обработки и регистрации измерительной информации во время поверки, наличие системы контроля.

Традиционно достоверность поверки определяется инструментальной погрешностью, то есть классом точности используемого рабочего образца [2]. Однако, практика свидетельствует о том, что такой подход справедлив только для узкого класса задач. Так, например, для электроизмерительных приборов переменного тока в качестве модели поверочного сигнала берут синусоидальную форму, хотя реальный сигнал обычно таковым не является. Таким образом, установление единства методологии процедур метрологического подтверждения СИТ является одним из ключевых условий обеспечения качества и достоверности измерений. Этот вопрос, вне всякого сомнения, является актуальным, теоретически и практически значимым, что и обусловило выбор темы данной статьи.

Подходы к оцениванию точности результатов практически выполненных измерений метрологических систем сегодня изучаются Кривовым А., Смирновой Е., Бондиным К., Николаевым П., Сергеевым С.Р.

Однако, несмотря на имеющиеся труды, ряд вопросов в данной предметной плоскости остается открытым. В частности, особого внимания заслуживают проблемы, связанные с усовершенствованием способов оценки и представления неопределенности измерения динамических переменных нелинейных динамических систем.

С учетом вышеизложенного, цель статьи заключается в рассмотрении особенностей поверки электроизмерительных приборов переменного тока (ЭИПТ) специальными сигналами с кусочно-ступенчатой аппроксимацией.

Рассмотрим поверочный кусочно-ступенчатый сигнал  $u_c(t)$ , который аппроксимирует периодический трапециевидный сигнал с периодом  $T$  (см. рис. 1).

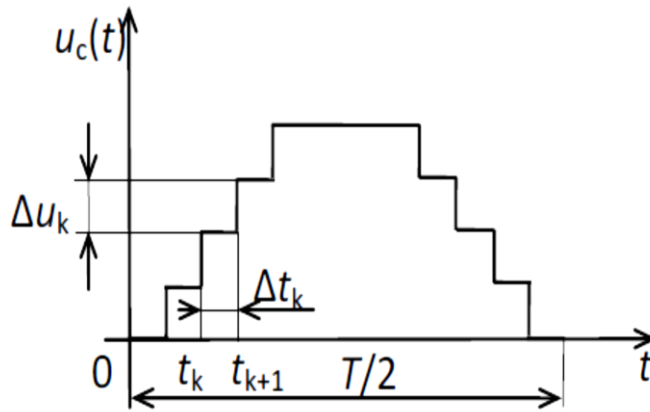


Рисунок 1 - Полупериод поверочного сигнала

Согласно рис. 1 точки переключения (моменты скачков) сигнала  $u_c(t)$  обозначаются через  $t_k$ , а уровень скачков в этих точках – через  $\Delta u_k$ , причем  $\Delta u_k > 0$  при возрастании и  $\Delta u_k < 0$  при уменьшении кусочно- ступенчатого напряжения  $u_c(t)$ . Поскольку напряжение  $u_c(t)$  является кусочно- постоянным периодическим сигналом, то корреляционная функция этого напряжения  $R_0(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) u_c(t - \tau) dt$  является кусочно-линейной функцией. Это означает, что ее первая производная  $R'_0(\tau)$  будет кусочно- постоянной функцией, а вторая производная  $R''_0(\tau)$  – суммой  $\delta$ -функций в точках  $t_k$ .

Для вычисления корреляционной функции токов в измерительных цепях ЭИПТ  $R_0(\tau) = \int_0^T g(\tau) R_0(\tau - t) dt$  используем разложение функции  $R(\tau)$  по степеням малого параметра  $\varepsilon = \omega \Delta t$ , где  $\omega$  – круговая частота основной гармоники периодического сигнала  $u_c(t)$ ;  $\Delta t$  – постоянная времени, определяемая реактивными элементами измерительных цепей ЭИПТ, тогда получим:

$$R(\tau) = G(0)R_0(\tau) + G'(0)R'_0(\tau) + \int_0^T g_1(\tau) R''_0(\tau - t) dt$$

$$g_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p_n^2} \frac{e^{p_n t}}{1 - e^{p_n t}}, 0 < t < T$$

Суммирование в этой формуле осуществляется по всем полюсам передаточной функции ЭИПТ  $G(p)$ :

$$G(p) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{p - p_n}$$

где  $p_n$  – полюсы передаточной функции  $G(p)$ ;  $A_n$  – остатки в этих полюсах.

Обобщенное выражение для оценки методической погрешности проверки ЭВПС периодическим кусочно- ступенчатым сигналом  $u_c(t)$  можно получить при условии, когда постоянная времени измерительной цепи прибора достаточно мала по сравнению с временным интервалом между соседними ступенями  $\Delta t_k = t_{k+1} - t_k$  (рис. 1).

Математически это условие означает, что для всех полюсов  $p_n$  передающей функции ЭИПТ  $G(p)$  выполняется неравенство  $|p_n| \Delta t_k \gg 1$ , которое можно записать следующим образом:

$$\frac{|p_n|}{\omega} \omega \Delta t_k \gg 1, \text{ т.е. } \frac{2\pi|p_n|}{\omega} \cdot \frac{1}{N} \gg 1$$

где  $N = T/\Delta t_k$  – количество ступеней в период  $T$  сигнала  $u_c(t)$ . Таким образом, должно выполняться неравенство  $N \ll (2\pi|p_n|)/\omega \sim 1/\varepsilon$ . Поскольку обычно  $\varepsilon \leq 10^{-3}$ , то это вполне реальное условие [3].



Таким образом, исходным соотношением для оценки методических погрешностей поверки ЭИППТ сигналами специальной формы с кусочно-ступенчатой аппроксимацией является обобщенное выражение:

$$\Delta R(\tau_i) \leq \frac{N}{T} (\Delta u)^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)A_n}{p_n^2}$$

где  $T$  - период кусочно-ступенчатого сигнала  $u_c(t)$  специальной формы;  $N$  – количество ступеней  $\Delta u_k$  напряжения  $u_c(t)$  за период  $T$ ;  $\Delta u = \sqrt{(\Delta u_k)^2}$  – среднее квадратическое значение ступеней  $\Delta u_k$  напряжения  $u_c(t)$ ;  $p_n$  – полюса передаточной функции  $G(p)$  поверяемого ЭИППТ;  $A_n$  – излишки в этих полюсах.

Как следует из выше представленной формулы, для оценки методической погрешности поверки каждого конкретного ЭИППТ необходимо знать его передаточную функцию и вычислить  $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-)A_n}{p_n^2}$ .

Подводя итоги отметим, что обобщенная математическая модель ЭИППТ и выражение для оценки методической погрешности поверки ЭИППТ кусочно-ступенчатыми сигналами специальной формы могут использоваться на практике для поверки и калибровки ЭИППТ сигналами, более близкими к реальным, чем модель синусоидального сигнала, которая применяется в настоящее время, что позволяет повысить достоверность поверки и калибровки ЭИППТ.

#### Библиографический список:

1. Naumov P.V. Development and research of a device for calibration and verification of electrical measuring instruments // Components of Scientific and Technological Progress. 2022. № 8 (74). С. 38-43.
2. Захарова А.Г. Автоматизация операций поверки и калибровки электроизмерительных приборов // Горное оборудование и электромеханика. 2021. № 5 (157). С. 41-50.
3. Ситникова А.Ю., Наугольнов О.А. Устройство для калибровки и поверки электроизмерительных приборов // Вестник молодёжной науки России. 2021. № 3. С. 45-52.

УДК 517.9:530.1

#### Оценки возмущений фазово-эквивалентных матричных потенциалов / Estimates of the phase-equivalent matrix potentials' perturbations

Семяшкина Е. И.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В данной работе рассмотрены возмущения неэрмитовых матричных потенциалов, эквивалентных с точки зрения фаз рассеяния, задачи рассеяния для системы радиальных уравнений Шредингера и даны им оценки.

**Ключевые слова:** задача рассеяния, данные рассеяния, рассеяние на полуоси, фазово-эквивалентные матричные потенциалы, возмущения матричных потенциалов.

**Abstract.** In this article the perturbations of non-Hermitian matrix potentials, which are equivalent in terms of scattering phases, of the scattering problem for a system of radial Schrödinger equations are considered and the estimates are given for them.

**Key words:** scattering problem, scattering data, scattering on the semi-axis, phase-equivalent matrix-valued potentials, the perturbations of the matrix-valued potentials.

Рассмотрим, как в [1] и [2], задачу рассеяния на полуоси с неэрмитовым матричным  $n \times n$  потенциалом, который имеет первый момент:

$$-Y''(x, k) + V(x)Y(x, k) = k^2 Y(x, k), \quad 0 < x < \infty, \quad Y(0, k) = 0, \quad (1)$$

$$-\tilde{Z}''(x, k) + \tilde{Z}(x, k)V(x) = k^2 \tilde{Z}(x, k), \quad 0 < x < \infty, \quad \tilde{Z}(0, k) = 0. \quad (2)$$

Для матричных решений Йоста уравнений (1) и (2) справедливы представления с помощью интегральных операторов преобразования при  $\text{Im } k \geq 0$

$$E(x, k) = Ie^{ikx} + \int_x^{+\infty} K(x, t) dt, \quad \tilde{E}(x, k) = Ie^{ikx} + \int_x^{+\infty} \tilde{K}(x, t) dt;$$

$$V(x) = -2 \frac{d}{dx} K(x, x) = -2 \frac{d}{dx} \tilde{K}(x, x).$$

Обозначим  $G(x, k)$ ,  $\tilde{G}(x, k)$  решения (1), соответственно (2), при условиях

$$G(0, k) = \tilde{G}(0, k) = 0; \quad G'(0, k) = \tilde{G}'(0, k) = I, \quad k \in \mathbb{R}. \quad (3)$$

Легко показать, используя тождества для матричных вронскианов (ср. [3]), что при  $k \in \mathbb{R}$

$$G(x, k) = \frac{1}{2ik} \{E(x, k) - E(x, -k)S(-k)\} \tilde{E}(-k),$$

где матрица рассеяния  $S(k)$ , в силу (3), имеет вид  $S(k) = \tilde{E}(-k)\tilde{E}^{-1}(k) = E^{-1}(k)E(-k)$ .

Как известно [3], в эрмитовом случае полюса матрицы  $E^{-1}(k)$  при  $\text{Im } k > 0$  простые. Таким образом, полуэрмитовым (квазиэрмитовым) задачам [1], т.е. фазово-полуэквивалентным или (и) фазово-тильда-полуэквивалентным [1] эрмитовой задаче, соответствуют матрицы  $E^{-1}(k)$  и  $\tilde{E}^{-1}(k)$ , которые могут иметь только простые полюса при  $\text{Im } k > 0$ . Заметим, что всякий полуэрмитов потенциал является одновременно и фазово-полуэквивалентным, и фазово-тильда-полуэквивалентным с какими-либо, вообще говоря, различными эрмитовыми потенциалами.

Значения нормировочных матриц задачи (1) или (2)

$$Z_j = i \text{Res}_{k_j} E^{-1}(k) E^{\wedge}(k_j) = i \tilde{E}^{\wedge}(k_j) \text{Res}_{k_j} \tilde{E}^{-1}(k),$$

где растущие решения  $E^{\wedge}(k_j)$ ,  $\tilde{E}^{\wedge}(k_j)$  образуют с решениями Йоста фундаментальные системы при  $k \neq 0$ , не зависят от выбора решений  $E^{\wedge}(k_j)$ ,  $\tilde{E}^{\wedge}(k_j)$ .

В [2] для введенных классов неэрмитовых (а именно, полуэрмитовых) задач рассмотрен вопрос о возмущениях матричных потенциалов, вызванных заданными возмущениями нормировочных матриц. Это дает нам возможность рассмотреть вопрос о возмущениях полуэрмитовых потенциалов, фазово-эквивалентных между собой, а также дать им оценку.

**Теорема.** Пусть полуэрмитовы потенциалы  $V_1(x)$  и  $V_2(x)$  фазово-эквивалентны между собой, тогда справедлива формула:

$$V_2(x) - V_1(x) = 2 \frac{d}{dx} \sum_{j=1}^p G_2(x, k_j) (R_j^{(2)} - R_j^{(1)}) \tilde{G}_1(x, k_j), \quad (4)$$

где  $R_j^{(m)} = \lim_{x \rightarrow 0} \frac{d}{dx} E_2(x, k_j) Z_j^{(m)} \frac{d}{dx} \tilde{E}_1(x, k_j)$ ,  $m = 1, 2$ . При  $m = 1, 2$  они связаны вырожденным оператором преобразования типа Повзнера–Левитана ( $\text{Im } k \geq 0$ ):

$$G_2(x, k) = G_1(x, k) + \sum_{j=1}^p G_2(x, k_j) (R_j^{(2)} - R_j^{(1)}) \int_0^x \tilde{G}_1(t, k_j) G_1(t, k) dt, \quad (5)$$

где матрицы-функции  $G_2(x, k_j)$  удовлетворяют системе линейных алгебраических уравнений при каждом  $x \geq 0$ :

$$\sum_{j=1}^p G_2(x, k_j) (I \delta_{lj} - (R_j^{(2)} - R_j^{(1)})) \int_0^x \tilde{G}_1(t, k_j) G_1(t, k_l) dt = G_1(x, k_l), \quad l = \overline{1, p}, \quad (6)$$

*Доказательство.* Легко видеть, в силу определения нормировочных матриц и (3), что

$$E_2(x, k_j) Z_j^{(2)} = G_2(x, k_j) E_2'(0, k_j) Z_j^{(2)}, \quad Z_j^{(1)} \tilde{E}_1(x, k_j) = Z_j^{(1)} \tilde{E}_1'(0, k_j) \tilde{G}_1(x, k_j). \quad (7)$$

Но так как  $V_m(x)$  фазово-эквивалентны, то по теореме 1 [1]  $\text{Ran } Z_j^{(2)} = \text{Ran } Z_j^{(1)}$ ,  $\text{Ker } Z_j^{(2)} = \text{Ker } Z_j^{(1)}$ , и потому

$$Z_j^{(2)} \tilde{E}_1(x, k_j) = Z_j^{(2)} \tilde{E}_1'(0, k_j) \tilde{G}_1(x, k_j), \quad (8)$$

$$E_2(x, k_j) Z_j^{(1)} = G_2(x, k_j) E_2'(0, k_j) Z_j^{(1)}, \quad (9)$$

где величины  $Z_j^{(2)} \tilde{E}_1'(0, k_j)$  и  $E_2'(0, k_j) Z_j^{(1)}$  существуют в смысле пределов при  $x \rightarrow 0$ .

Умножая (8) слева на  $E_2(x, k_j)$ , а (9) справа на  $\tilde{E}_1(x, k_j)$ , получим, учитывая (7) и выражения для  $R_j^{(m)}$ , что

$$E_2(x, k_j) Z_j^{(2)} \tilde{E}_1(x, k_j) = G_2(x, k_j) R_j^{(2)} \tilde{G}_1(x, k_j);$$

$$E_2(x, k_j) Z_j^{(1)} \tilde{E}_1(x, k_j) = G_2(x, k_j) R_j^{(1)} \tilde{G}_1(x, k_j),$$

откуда, в силу теоремы из [2], получаем (4). Соотношения (5) и (6) выводятся с использованием леммы 6.2.1 [3] и представлений Левина для решений Йоста аналогично тому, как аналогичные формулы выводятся в [2].

Отметим, что выражение (4) эквивалентно в скалярном вещественном случае формуле эквивалентных потенциалов Йоста и Кона, которая выводится обычно, исходя из уравнения Гельфанда–Левитана. Заметим, что уравнение Гельфанда–Левитана для случая операторозначного или матричного, в том числе и неэрмитова локально суммируемого произвольного потенциала, содержится в [4]. Теорема доказана.

**Следствие.** При условиях теоремы, обеспечивающих (4), будет верна оценка для полуэрмитовых потенциалов, которые фазово-эквивалентны между собой,  $|V_2(x) - V_1(x)| = O(x)$ ,  $x \rightarrow 0$ .

Следствие вытекает из формулы (4) с очевидностью.

**Замечание.** При условиях аналогичной теоремы [2] будет верна оценка для полуэрмитовых потенциалов  $|V_2(x) - V_1(x)| = O(e^{-\min_j |k_j| x})$ ,  $x \rightarrow \infty$ .

### Библиографический список:

1. Бондаренко Е.И., Рофе-Бекетов Ф.С. Фазово-эквивалентные матричные потенциалы // Электромагнитные волны и электронные системы. (Рубрика: Новые математические методы.) – 2000. – Т. 5, № 3. – С. 6-24.
2. Семяшкина Е.И. Возмущения фазово-эквивалентных матричных потенциалов // Современные проблемы развития Европейского Севера: материалы конференции / под редакцией Р. В. Агиней. – Ухта : УГТУ, 2022. – С. 35-37.
3. Агранович З.С., Марченко В.А. Обратная задача теории рассеяния. – Харьков: Изд-во ХГУ, 1960.
4. Рофе-Бекетов Ф.С. разложение по собственным функциям бесконечных систем дифференциальных уравнений в несамосопряженном и самосопряженном случаях // Мат. сб. – 1960. – Т. 51, №3. – С. 293-343

**Электроснабжение слесарного участка механического цеха  
машиностроительного завода**

Вайник К. В.

Научный руководитель – Старцев А. Э.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Разработан объем работ по проектированию электроснабжения слесарного участка механического цеха машиностроительного завода с расчетом и выбором оборудования, освещения, аварийного освещения, оценкой экономической эффективности, расчетом заземления подстанции.

**Ключевые слова:** разработка проекта; выбор оборудования; оценка экономической эффективности; заземление подстанции.

В наше время технологии развиваются невероятно стремительно. Научно-технический прогресс с каждым годом заставляет все больше и больше предприятий вводить мероприятия по реконструкции, модернизации, доработки промышленных объектов. Даже с учетом огромных затрат на проведение данных работ, все равно это вносит огромный вклад в развитие технологий изготовления и повышение качества готовой продукции.

Не стоит забывать, что залог успеха – это достижение максимальной экономической эффективности, ведь без нее проект может очень долго себя окупать, либо не стать успешным вовсе и понести потери для предприятия. Так же для правильного проектирования электроснабжения стоит учитывать запланированное предприятием развитие энергосистемы на последующие 5 лет с перспективой в 10 лет. В любом проекте вводимое оборудование должно не только удовлетворять требуемым мощностям и характеристикам, но и быть хорошо подобранным с точки зрения экономичности. Трансформаторы должны быть подобраны под нужные значения напряжений и токов, проложенные кабельные линии должны быть оптимальны по сечению, количеству жил и степени защиты.

В своей выпускной квалификационной работе я взял для разработки слесарный участок механического цеха машиностроительного завода. Данный завод принял решение о смене места дислокации помещения механического цеха для повышения мощностей производства. В процессе переезда планируется внедрение дополнительного оборудования, нового вида оборудования, принятие мер по модернизации старого оборудования и в целом расширение спектра производственных работ.

В состав слесарного участка входит слесарно-механическое отделение, механическое отделение, заготовительно-сварочное отделение и механосборочное отделение. Вследствие переноса и модернизации механического цеха возникла потребность в проектировании новой системы электроснабжения, отвечающей высоким требованиям оборудования и современным стандартам качества и безопасности.

По ходу проекта будут выбраны трансформаторы исходя из требований участка, устройства для компенсации реактивной мощности, помогающие повысить коэффициент мощности оборудования и снизить нагрузку на трансформатор, а следовательно, усовершенствовать энергосистему предприятия. Так же будут рассчитаны осветительные сети для требуемого по нормативным документам количества освещенности, разработано аварийное освещение.

Для обязательного обеспечения безопасности на рабочем объекте потребуется проработать и учесть нормы здравоохранения и проследить за безопасностью труда. Для этого я буду обращаться к нормативным документам по обеспечению безопасности проведения работы на электрических предприятиях.

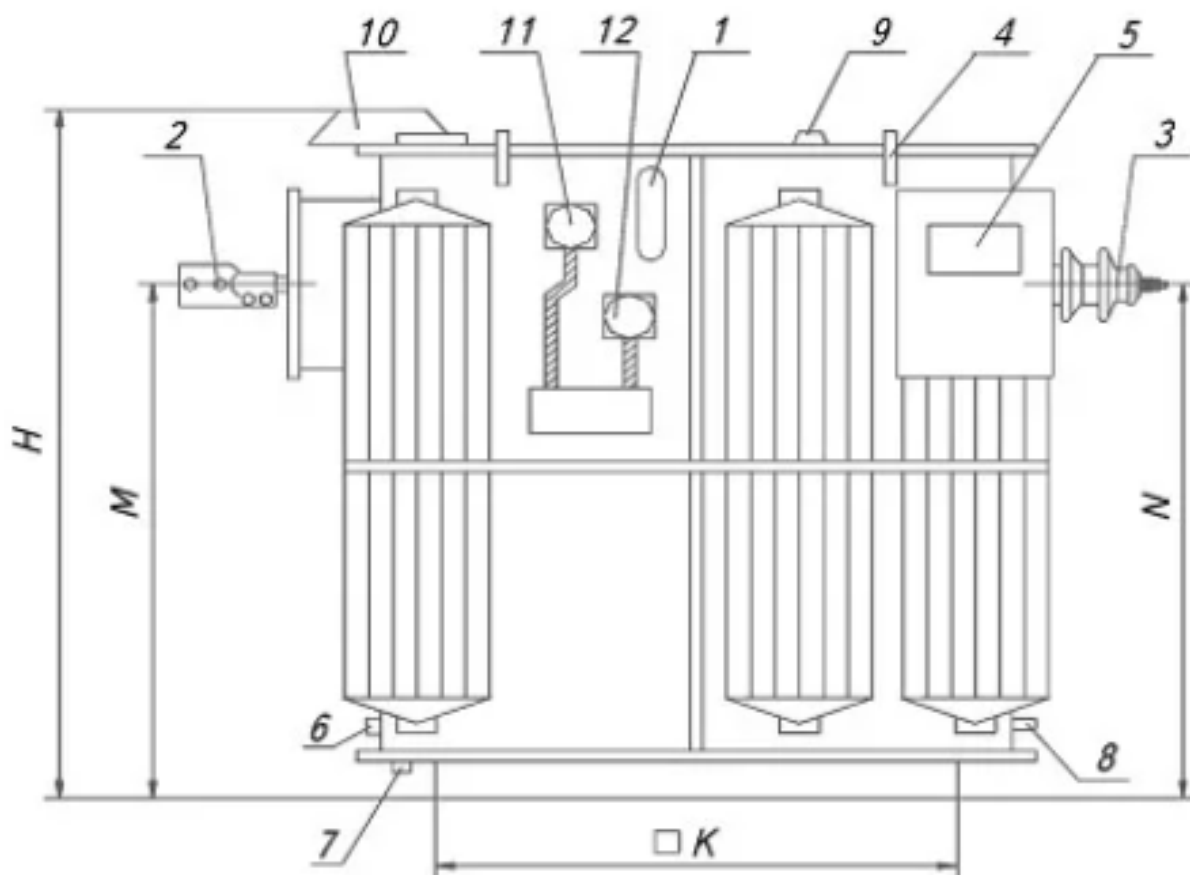
В проекте так же требуется просчитать и оценить экономическую эффективность работы, поэтому при выборе оборудования будет выбран так же и другой вариант с похожими характеристиками для последующего сравнения данных вариантов и выбора более целесообразного.

Используя исходные данные по каждому из узлов слесарного участка, рассчитаны электрические нагрузки для электроприемников II и III категории электроснабжения. По результатам расчетов было выявлено, что узел №6 имеет наибольшую потребляемую

мощность, узел №2 напротив является наименее нагруженным, наибольший и наименьший коэффициент использования принадлежат узлу №1 и узлу №6 соответственно. Эти данные будут учтены в последующем выборе оборудования.

По данным о геометрических размерах помещений, характеристикам среды и требуемым типам источников света были рассчитаны и выбраны требуемые осветительные приборы. Так же была проработана схема питающей осветительной сети. После этого выбраны и проверены на нагрузки и нагрев проводники для системы освещения.

По сумме расчетных нагрузок были подобраны трансформаторы для комплектной подстанции. К установке были выбраны трансформаторы с герметичным масляным баком особой прочности, с азотной защитой масла от прямого контакта с окружающей средой в целях предотвращения окисления, а как итог – изменения его технических характеристик. Трансформаторы марки ТМЗ-630/10, где 630 – номинальная мощность, кВА, 10 – класс обмотки высокого напряжения, кВ. Т – трансформатор трехфазный, М – масляное охлаждение, З – с защитой при помощи азотной подушки. Схематичное изображение данного трансформатора представлено на рисунке 1.



- 1 – маслоуказатель, 2 – ввод низкого напряжения, 3 – ввод высокого напряжения, 4 – транспортировочный крюк, 5 – заводской информационной щит, 6 – пробка для взятия масла, 7 – пробка для спуска осадка, 8 – болт заземления, 9 – привод переключателя, 10 – диафрагма предохранителя, 11 – мановакуумметр, 12 – термосигнализатор.

Рисунок 1 – Схематичное изображение трансформатора ТМЗ-630/10

Далее по ходу проекта выбираются устройства для компенсации реактивной мощности исходя из пропускной способности трансформатора и условия обеспечения заданного коэффициента мощности на шинах КТП для выполнения баланса реактивной мощности. По итогам расчета, были выбраны для обеих секций шин конденсаторные установки КРМ-0,4-350 общей мощностью для каждой – 350 кВар.

По ранее рассчитанному наибольшему току нагрузки и условий нагрева при нем в нормальном режиме, а также по работе с перегрузкой в послеаварийном режиме производится выбор сечений кабельных линий напряжением 10 кВ, питающих КТП.

В экономической части ВКР для оценки экономической эффективности было проведено сравнение проектного варианта электроснабжения и возможного варианта. По итогу проектный вариант является гораздо более экономически целесообразным и будет принят как готовый к исполнению.

Так же будут рассмотрены вопросы охраны труда и обеспечения безопасности при эксплуатации с электроустановок.

### **Библиографический список:**

1. Правила устройства электроустановок. Издание седьмое: [Текст], 2014. – 464 с.;
2. Кнорринг Г.М. Справочная книга для проектирования электрического освещения: [Текст] / Г.М. Кнорринг, Ю.Б. Оболенцев, Р.И. Берим и др.; ред. Кнорринг Г.М. – М.: Энергия, 1976. – 384 с.
3. ГОСТ 32144-2013. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения. Общего назначения» [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200104301> (дата обращения 07.05.2023);
4. А.В. Кабышев, С.Г. Обухов. Расчет и проектирование систем электроснабжения: Справочные материалы по электрооборудованию: [Текст] учебное пособие / Кабышев А.В.– М.: Том. политехн. ун-т. – Томск, 2005. – 168 с.
5. Беляев А.В. Библиотека электромонтёра: Выпуск 617; Выбор аппаратуры, защит и кабелей в сетях 0,4 кВ: [Текст] / Беляев А.В.– М.: Энергоатомиздат, 1988. –171 с.

УДК 621.311.1(470.12)

### **Реконструкция системы электроснабжения КЦ-1 КС-21 «ШЕКСНА»**

Полетаева С. Н.

Научный руководитель – Тетеревлева Е. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

Шекснинское ЛПУМГ является одним из двадцати четырех филиалов ООО «Газпром трансгаз Ухта», главная задача которого – обеспечение стабильного газоснабжения и надежного функционирования газотранспортной системы, поставка газа потребителям, развитие способствующих эффективной работе газотранспортной системы производства.

В рамках проведения импортозамещения и снижения затрат на электроэнергию предлагается провести реконструкцию системы электроснабжения первого компрессорного цеха. Основная цель работы – объединение двух комплектных трансформаторных подстанций: собственных нужд и АВО газа. Для данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Произвести расчет электрических нагрузок после объединения КТП;
2. Выбрать силовые трансформаторы большей мощности;
3. Заменить кабельные линии и коммутационные аппараты;
4. Произвести расчет токов короткого замыкания и на их основании произвести проверку выбранного оборудования;
5. Рассчитать релейную защиту.

Для определения электрических нагрузок используем метод коэффициента максимума. Этот метод применим, если известны следующие исходные данные: количество электроприемников, их номинальные мощности и технологическое назначение [1].

По результатам вычислений получили следующие данные: максимальную активную мощность  $P_m = 1507,8$  кВт; максимальная реактивная мощность -  $Q_m = 649,78$  кВар.

Максимальную полную мощность определяем по формуле:

$$S_m = \sqrt{P_m^2 + Q_m^2} = \sqrt{1507,8^2 + 649,78^2} = 1508 \text{ кВЧА.}$$

При выборе силового трансформатора нужно учитывать, что при длительных перегрузках на время максимума нагрузки на 40% мощность выбирается равной 0,7 от максимальной нагрузки. Поскольку в системе преобладают электроприемники первой категории на подстанции

необходимо устанавливать два трансформатора. Также нужно учитывать, что при аварийном отказе одного из трансформаторов обеспечивается питание всех потребителей.

Определяем мощность трансформатора, исходя из условий:

$$S_{н.тр.} \geq 0,7 \sum S_{м},$$

где  $S_{н.тр.}$  - номинальная полная мощность трансформатора, кВ·А.

Выбираем трехфазный сухой трансформатор с литой изоляцией и защищенным исполнением ТСЗЛ-1600/10/0,4.

После объединения подстанций получили одну четырехсекционную с двумя трансформаторами и питанием от двух независимых источников. Секции шин попарно соединены секционным выключателем – первая со второй, третья с четвертой. Упрощенная схема соединений представлена на рисунке 1.

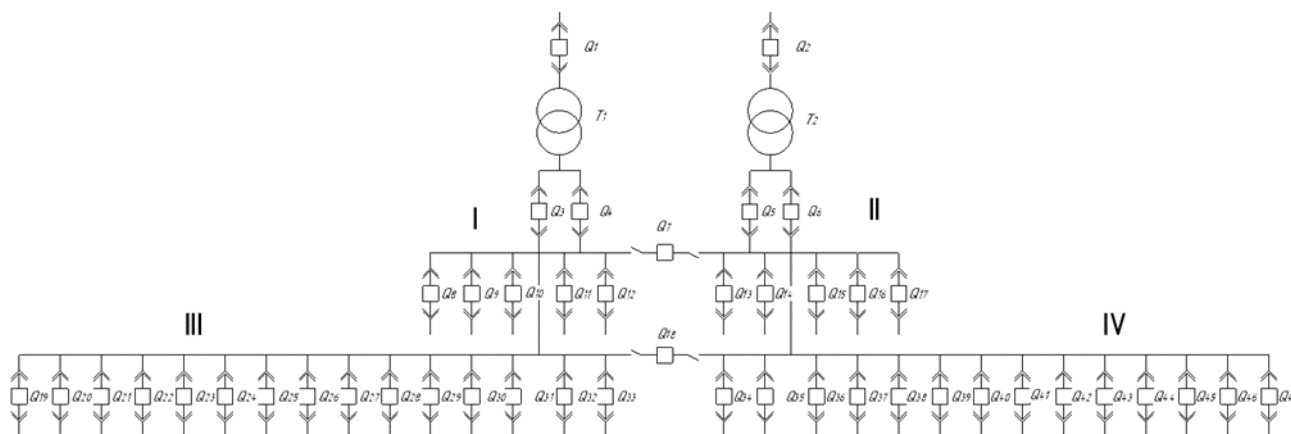


Рисунок 1 – Упрощенная схема соединений КТП

На стороне 0,4 кВ производится выбор сечений кабельных линий. В сетях напряжением до 1 кВ сечение выбирают по допустимому длительному току из условия нагрева. При этом должно выполняться следующее условие:

$$I_p \leq I_{дл.доп.},$$

где  $I_p$  - расчетный ток нагрузки, А.

По результатам расчетов выбрали кабельные линии марки ВББШвнг следующих сечений: 5г 150, 4г 50, 4г 35, 4г 25, 4г 10.

Надежная и экономичная работа электротехнических устройств и токопроводящих частей обеспечивается их правильным выбором по условиям эксплуатации как в длительном режиме, так и в режиме короткого замыкания.

Для длительной эксплуатации подстанционное оборудование выбирают по номинальному току, номинальному напряжению, типу установки, конструкции, току и мощности отключения. После подбора аппаратов и проводников проверяют электродинамическую и термическую стойкость при протекании токов короткого замыкания, вызывающих наибольшее механическое напряжение и нагрев. Отключающие устройства также выбираются исходя из отключающей способности.

Релейная защита представляет собой комплекс специальных автоматических устройств, предназначенных для предотвращения развития аварий в электроэнергетической системе и ее элементах [2].

Основными функциями релейной защиты являются:

1. Автоматическое обнаружение поврежденного элемента с последующей локализацией;
2. Автоматическое определение некорректного режима с принятием мер по его устранению.

Предъявляемые требования к релейной защите:

1. Селективность – релейная защита должна обнаружить поврежденный элемент и выдать команду на обнаружение (отключение) этого элемента через ближайшие к месту неисправности выключатели.

2. Чувствительность – защита должна четко фиксировать все виды повреждений, предусмотренные алгоритмом ее работы.

3. Быстродействие – быстрое отключение при неисправности снижает повреждение оборудования из-за тепловых и динамических токов, уменьшает влияние падения напряжения на работу нагрузки и увеличивает вероятность сохранения стабильности параллельного питания системы.

4. Надежность – защита должна иметь аппаратную и функциональную надежность. Она обеспечивается надежностью его отдельных компонентов и правильными условиями эксплуатации. Функциональная надежность достигается за счет совершенствования алгоритма функционирования защиты.

На реконструируемом объекте предлагается установить релейную защиту на основе устройств «Сириус» фирмы «Радиус – Автоматика». Прибор является надежным современным микропроцессорным устройством отечественного производства.

Для выполнения функции автоматического ввода резерва принимаем микропроцессорный терминал релейной автоматики – устройство АВР «Сириус-АВР-220В-Р».

Для обеспечения безопасного выполнения работ на объекте рассмотрены условия охраны труда при эксплуатации электроустановок. Также рассчитываются показатели экономической эффективности для определения рентабельности проекта.

### **Библиографический список**

1. Щербаков, Е. Ф. Электроснабжение и электропотребление на предприятиях: учебное пособие / Е. Ф. Щербаков, Д. С. Александров, А. Л. Дубов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2023. – 495 с.

2. Андреев, М. В. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие / М. В. Андреев, Н. Ю. Рубан, А. А. Суворов [и др.]; Томский политехнический университет. - Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2018. - 167 с.

УДК 621.313.84

### **Резонансные явления в шаговых двигателях**

Старцев А. Э.<sup>1</sup>, Уляшев А. Е.<sup>2</sup>, Полетаев С. В.<sup>1</sup>

*1 - Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

*2 - Филиал федерального государственного унитарного предприятия*

*«Российская телевизионная и радиовещательная сеть»*

*«Радио телевизионный передающий центр Республики Коми, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена проблема возникновения резонанса шаговых двигателей (ШД). Так же проведен сравнительный анализ методов борьбы с резонансом

**Ключевые слова:** шаговый двигатель, сервопривод, резонанс

Шаговые двигатели — это электромеханические устройства, которые преобразуют сигналы управления в угловое или линейное движение ротора и фиксируют ротор в нужном положении без устройств обратной связи. Они являются экономически эффективным решением для приложений, где требуется высокая точность позиционирования и контроль скорости, а требуемый крутящий момент или скорость малы. Конструктивно шаговые двигатели можно разделить на несколько групп: двигатели с переменными магнитами, двигатели с постоянными магнитами и гибридные двигатели.

Сервоприводы состоят из датчика (положения, скорости, усилия и т.д.) и блока управления приводом (электронной схемы или механического звена), который автоматически поддерживает параметры, необходимые для датчика.



По сравнению с шаговыми двигателями сервоприводы имеют ряд преимуществ и недостатков. Основными преимуществами сервоприводов являются более высокая скорость, меньшее энергопотребление и более высокий крутящий момент. Недостатками являются сложность системы управления, проблемы, связанные с блокировкой ротора, и высокая цена.

Резонанс возникает при определенных скоростях из-за дискретного характера движения двигателя. Резонанс — это внезапное увеличение амплитуды вибрации, когда частота вынужденной вибрации совпадает с частотой собственной вибрации. Этот эффект характерен для всех шаговых двигателей и выражается во внезапном гудении, вибрации и сильном падении крутящего момента. Это может привести к пропуску шагов, потере синхронизации между двигателем и контроллером, а в некоторых случаях двигатель может даже полностью остановиться.

Шаговые двигатели имеют два типа резонанса: низкочастотный и среднечастотный. На определенных частотах также наблюдается "срыв" кривой выходного крутящего момента, что ограничивает максимальную скорость шагового двигателя. Низкочастотные резонансы вызываются колебаниями значения тока в обмотках фаз статора шагового двигателя.

Современные драйверы ШД за счет обратной связи по току фазы обмотки статора и регулятору напряжения в фазе на основе широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяют поддерживать практически постоянной величину тока в фазе во всех режимах. Это наглядно демонстрируют осциллограммы токов фаз ШД (условно А и В), полученные экспериментально (ШД – 57HS5630B4, драйвер – Toshiba TB6600), представлены на рис. 1

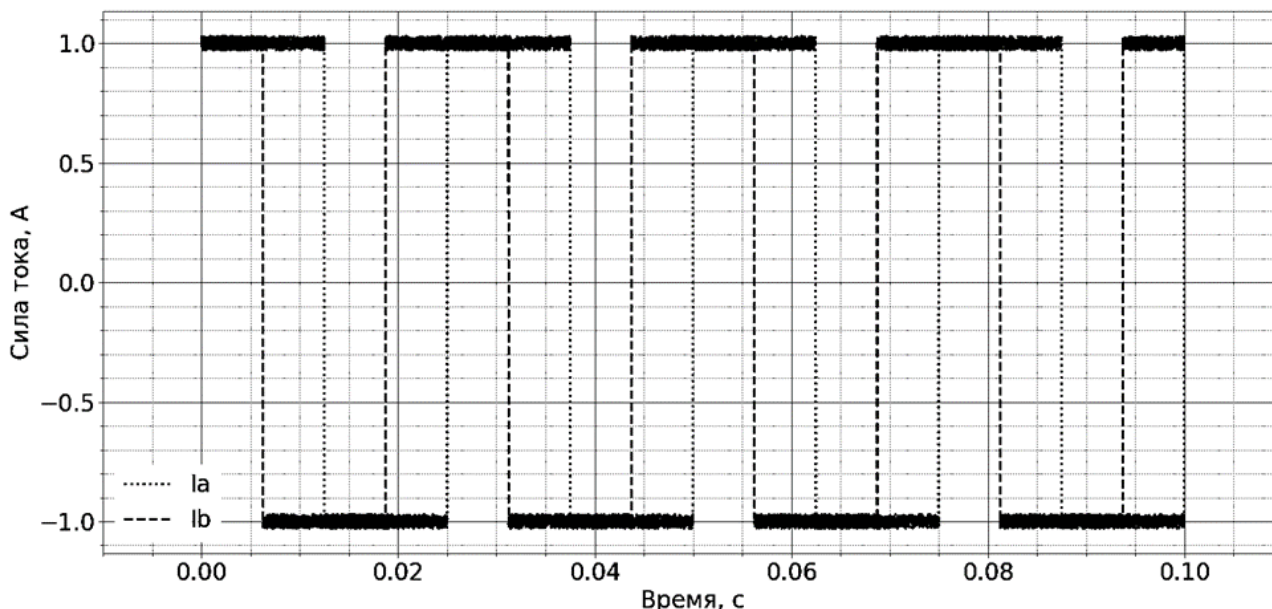


Рисунок 1 - Осциллограммы токов фаз статора шагового двигателя

▪ Среднечастотные резонансы вызваны совпадением собственной частоты с вынужденной. Частота, на которой возникают такие резонансы, определяется по (1)

$$f_0 = \frac{100}{2\pi} \sqrt{\frac{2pM_h}{J_R + J_L}} \quad (1)$$

где  $M_h$  – момент удержания для выбранного способа управления и тока фаз

$p$  – число пар полюсов;

$J_R$  – момент инерции ротора;

$J_L$  – момент инерции нагрузки.

▪ При экспериментальном исследовании гибридных ШД было установлено, что резонансные явления возникают также на скоростях, соответствующих частоте импульсов фаз равной резонансным частотам при измерении взаимной индуктивности фаз статора (рис.2), согласно математической модели ШД [1].

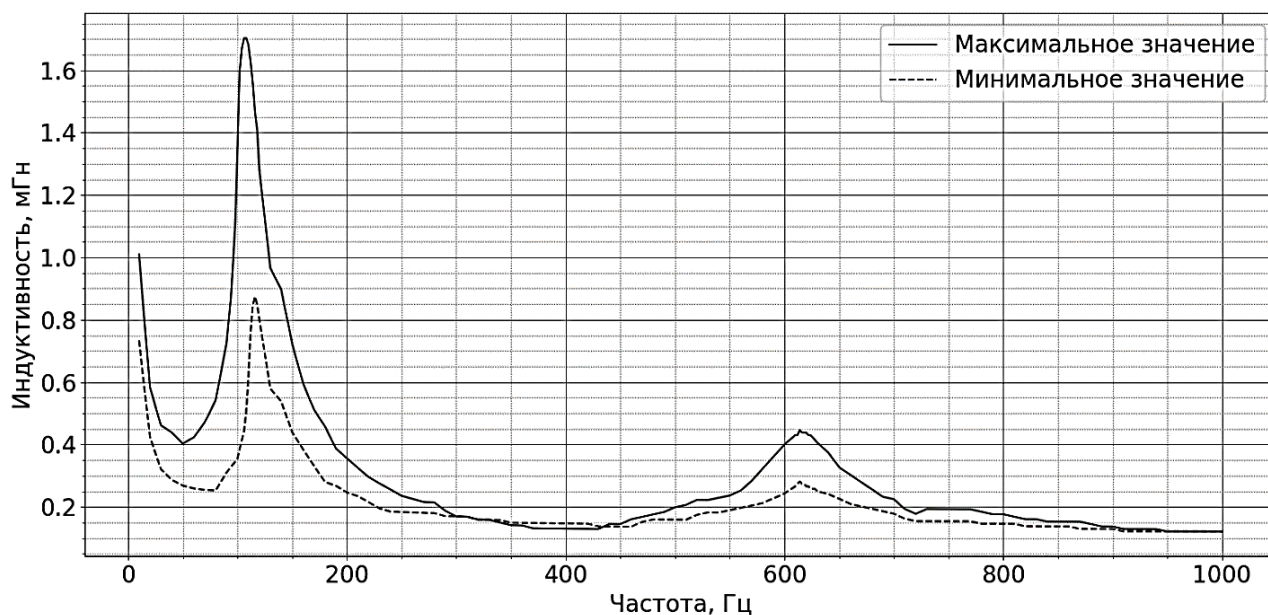


Рисунок 2 - Зависимость взаимной индуктивности фаз от частоты напряжения в фазе статора ШД

На основании формулы (2), очевидно, что эти процессы могут быть обусловлены резонансными явлениями между магнитосвязанными обмотками фаз статора [1]

$$\begin{cases} (L_a - M_{ab} / L_b)(di_a / dt) = V_a - (M_{ab} / L_b)V_b, \\ (L_b - M_{ab} / L_a)(di_b / dt) = V_b - (M_{ab} / L_a)V_a, \\ J(d\omega / dt) = -\left( (E_{ga}i_a) / \omega + (E_{gb}i_b) / \omega \right) + i_a i_b (dM_{ab} / d\theta) - B\omega - M_c, \\ d\theta / dt = \omega. \end{cases} \quad (2)$$

где  $L_a, L_b$  – индуктивность фаз статора А и В соответственно;  
 $i_a$  и  $i_b$  – сила тока в обмотке фаз статора А и В соответственно;  
 $U_a$  и  $U_b$  – напряжение в обмотке фаз статора А и В соответственно;  
 $R$  – активное сопротивление фазы обмотки статора;  
 $K_m$  – постоянная двигателя;  
 $M_{ab}$  – коэффициент взаимной индуктивности фаз статора;  
 $\omega$  – угловая скорость вращения вала;  
 $\theta$  – угловое положение вала;  
 $p$  – число пар полюсов ротора;  
 $J$  – приведенный момент инерции ротора;  
 $B$  – коэффициент вязкого трения подшипников;  
 $E_{ga}$  и  $E_{gb}$  – противо-ЭДС фаз статора А и В соответственно;  
 $M_c$  – приведенный момент сопротивления на валу ШД,  
 $V_a = U_a - i_a R + K_m \omega \sin(p\theta)$ ,  
 $V_b = U_b - i_b R - K_m \omega \cos(p\theta)$ .

Существует несколько способов борьбы с резонансом. Все эти способы можно разделить на несколько групп.

- Первая группа — это механические решения. В основе механических методов борьбы с резонансом может лежать как изменение моментов инерции колеблющихся элементов, так и использование демпфирующих элементов.

Использование муфт. Муфты используются для соединения двух валов, расположенных на одной оси под углом друг к другу, для передачи крутящего момента. Помимо этого, упругие муфты позволяют демпфировать резонансные колебания. Для этого применяются муфты с переменной жесткостью. В таких муфтах применяются неметаллические упругие элементы,

материалы которых не подчиняются закону Гука. Если при работе возникает резонанс, то, следовательно, растет и амплитуда колебаний. При росте амплитуды растет нагрузка на муфту и угол закручивания, но при таких значениях муфта имеет другую жесткость, на которой резонанса не возникает. Система будет возвращаться к первому состоянию и т.д., следовательно при использовании муфты с переменной жесткостью не возникает «классический» резонанс.

Изменение механических характеристик ротора. Так как, согласно формуле (1), резонансная частота зависит от моментов инерции, то для смещения этой частоты в нерабочий диапазон можно изменить момент инерции. Изменить его можно, добавив маховую массу, или наоборот, удалив.

- Вторая группа — это электрические решения, например, короткое замыкание обмоток, которые в данный момент не используются, увеличение мощности питания и т.д. Есть решения на уровне систем автоматического управления, например, использование полушаговых или микрошаговых режимов, переменных режимов питания обмоток и т.д.

При колебаниях ротора, который является постоянным магнитом, в обмотках фаз статора возникает ЭДС. Если не используемые обмотки закоротить, то при колебаниях в них будет наводиться ток. В результате энергия колебаний будет рассеиваться в виде тепла.

- Решения на уровне алгоритма работы

Чередование однофазного и двухфазного режима. Шаговый двигатель может работать во многих режимах. Режимы делятся на полношаговый, полушаговый и микрошаговый. В полношаговом режиме можно использовать две фазы одновременно, либо одну. Согласно формуле (1), резонансная частота зависит от момента удержания. При использовании разного числа катушек ротор удерживается магнитными полями разной величины, и, следовательно, резонансная частота различается. Исходя из этого для преодоления резонансной частоты можно чередовать режимы работы двигателя.

Наиболее простым и не затратным способом борьбы с резонансом является избегание резонансных частот в работе с двигателем. Использование этих частот легко ограничить в управляющей программе. Основным минусом является потеря скорости в том случае если подача при обработке совпадет с резонансной частотой двигателя.

Выводы

В ходе работы были проанализированы типовые причины возникновения резонанса в шаговых двигателях, а также способы борьбы с ним. Установлен факт возникновения резонансных явлений, обусловленных электромагнитными процессами в ШД, который требует дальнейшего исследования.

### **Библиографический список:**

1. Математическая модель гибридного шагового двигателя / А.Е. Уляшев, А.Э. Старцев, П.С. Шичёв // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». 2022. № 3. С. 90–102.

УДК 621.311(470.13)

### **Обоснование основных технических этапов реконструкции ТП № 605 и системы электроснабжения Сосногрского ГПЗ**

Чукилев А. Е.

Научный руководитель - Старцев А. Э.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

**Аннотация:** в статье рассматривается реконструкция трансформаторной подстанции. Рассмотрены методики выбора нового электрооборудования и новых кабельных линий, расчета молниезащиты и заземления подстанции.

**Ключевые слова:** электрооборудование, электроснабжение, электрические нагрузки, кабельные линии, выбор числа трансформаторов.

Развитие электрических сетей в условиях формирования и дальнейшего эффективного функционирования рынка электроэнергии должно учитывать факторы, которые обусловлены

стремительным научно-техническим прогрессом. Так в программах развития электроэнергетики до 2030 года важное место уделено вопросу энергетической безопасности, при этом указаны задачи развития электроэнергетики. В числе этих задач следующее; обеспечение гарантии надежного энергоснабжения, повышение эффективности использования энергоресурсов, уменьшение вредного воздействия на окружающую среду.[1]

Одним из направлений работы по выполнению перечисленных задач являются инновационное проектирование электросетей, в рамках которого реализуется:

- внедрение в схемах электроснабжения новых и передовых технических решений;
- применение современных методик расчетов;
- использование в проектах строительства и реконструкции электросетей современных конструкторских разработок и материалов.

Газоперерабатывающий завод в городе Сосногорск это одно из подразделений ООО «Газпром переработка» ПАО «Газпром». Рассматриваемая в данной работе ТП №605, расположенная на самом заводе и являющаяся неотъемлемой частью системы электроснабжения площадок №1 и №3.

Основными потребителями электрической энергии комплектной трансформаторной подстанции №605 являются сети освещения, противопожарные устройства защиты, электропотребители собственных нужд подстанции, средства связи, распределительные подстанции. ТП №605 Сосногорского газоперерабатывающего завода (СГПЗ). Была введена в эксплуатацию в 1988 году и соответственно имеющееся оборудование физически изношено и стало не ремонтно-пригодным.

По данным Сосногорского ГПЗ требуемый расчет электрооборудования для производственных цехов должен быть I категории надежности. К первой категории электроснабжения относятся наиболее важные потребители, перерыв в электроснабжении которых может привести к аварийным ситуациям, угрожающим жизни людей. Принимая во внимание тот факт, что существующая ТП №605 с имеющимся старым оборудованием не сможет выполнить вышеуказанные условия, возникает необходимость осуществить реконструкцию ТП №605 путем замены старого электрооборудования на новое, которое будут соответствовать современным технологиям, требованиям охраны окружающей среды и нормам безопасности.

Основным этапом при расчете систем электроснабжения является определение электрических нагрузок. По их значению выбирают и проверяют электрооборудование системы, определяют потери мощности и электроэнергии.

Результатам проведенных расчетов являются найденные значения реактивных и активных максимальных мощностей, максимальных значений тока, что дает нам возможность произвести расчеты для выбора конденсаторных установок, необходимых для компенсации реактивной мощности, понижающих силовых трансформаторов.[2]

Компенсация реактивной мощности, в настоящее время, является немаловажным фактором, позволяющим решить вопрос энергосбережения и снижения нагрузок на электросеть. По оценкам отечественных и ведущих зарубежных специалистов, доля энергоресурсов, и, в частности, электроэнергии занимает значительную величину в себестоимости продукции.

Для компенсации реактивной мощности (увеличения  $\cos\varphi$ ) применяются:

- 1) конденсаторные батареи (КБ);
- 2) синхронные двигатели (СД);
- 3) вентильные статические источники реактивной мощности (ИРМ).

В этом случае для увеличения  $\cos\varphi$  используем такой способ, как применение конденсаторных батарей (КБ), которые выпускаются электротехнической промышленностью в виде комплектов компенсирующих устройств (ККУ).[3]

Правильный выбор числа и мощности трансформаторов, предназначенных для преобразования электроэнергии в сетях энергосистем на промышленных подстанциях, является одним из важных вопросов электроснабжения и построения рациональных сетей. В нормальных условиях трансформаторы должны обеспечивать питание всех потребителей предприятия при их номинальной нагрузке.

Число трансформаторов на подстанции определяется требованием надёжности электроснабжения. Наилучшим вариантом является установка двух трансформаторов, обеспечивающих бесперебойное электроснабжение потребителей цеха любых категорий.

Выбор числа и мощности трансформаторов для ТП №605 производится следующим образом:

1) так как в нашем случае, потребители подстанции относятся к первой категории объектов по надёжности электроснабжения, а для электропотребителей этой категории, запитанных от одной подстанции необходимо иметь минимум по одному трансформатору на каждую секцию шин, поэтому для соблюдения категоричности необходимо установить два трансформатора;

2) в аварийном режиме, т. е. при выходе одного трансформатора или линии из строя, второй трансформатор не должен быть перегружен более чем на 40% в течение 5 суток по 6 часов каждые сутки, т. е. коэффициент загрузки в аварийном режиме не должен превышать 1,4: [4,5]

Электрические сети напряжением до 1 кВ являются составной частью системы электроснабжения промышленного предприятия и осуществляют непосредственное питание большинства электроприемников. Схема внутрицеховой сети определяется технологическим процессом производства, планировкой и расположением, взаимным расположением трансформаторной подстанции, электроприемниками и вводами питания, расчётной мощностью, требованиями к бесперебойности электроснабжения.[6]

Таким образом предполагаемая реконструкция позволяет уменьшить потери в электрической сети и увеличивает надёжность всей электросистемы, а также увеличивает уровень автоматизации на основе новых конструктивных решений.

#### **Библиографический список:**

1. Энергетическая стратеги России: [Электронный ресурс]. URL: <https://minenergo.gov.ru/sites/default/files/documents/11/10/1920/document-66308.pdf>. (Дата обращения 24.05.2023)
2. Ягубов, З.Х. Электрические схемы [Текст]: метод. указания по выполнению электрических схем в курсовых и дипломных проектах (работах)/ З.Х. Ягубов, А.Л. Коротких. – Ухта: УГТУ, 2007. – 74 с.: ил.
3. Липкин, Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок [Текст]: учеб. для электротехн. спец. учеб. заведений/ Б.Ю. Липкин. - Издание 4-е переработанное и дополненное – Москва: Высшая школа, 1990 г. - 386 с.
4. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей [Текст]. – 8-й выпуск. – Новосибирск: Изд-во Сиб. унив., 2007. – 253 с.
5. Неклепаев, Б.Н. Электрическая часть электростанций и подстанций [Текст]: справ. материал для курс. и диплом. проектирования/ Б.Н. Неклепаев, И.П. Крючков. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоатомиздат, 1989. – 605 с.
6. Кацман, М.М. Справочник по электрическим машинам [Текст]: учебное пособие для студентов образовательных учреждений сред. проф. образования/ М.М. Кацман. - Москва: Издательский центр «Академия», 2005 – 480 с.

УДК 621.311.1(470.13)

#### **Реконструкция систем электроснабжения подстанции «Советская» города Воркуты**

Карабанов Б. Д.

Научный руководитель – Полетаев С. В.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

Электроэнергетическая система предполагает собою комплекс взаимосвязанных электростанций, электросетей и потребителей электричества, сопряженных одинаковостью режима и непрерывностью хода производства, распределения и потребления электричества

Электроэнергия на сегодняшний день используется во всех отраслях жизнедеятельности и промышленности в целом. Электрическая часть энергосистемы есть неотъемлемая часть энергоотрасли и служит для передачи электроэнергии потребителям всем типам современного бизнеса.

Развитие энергосистемы определяет направление развития бизнеса и государства в целом. Показатели надежности электроснабжения электроэнергией с требуемыми показателями качества – это основная задача электроэнергетических систем. Энергосистема обязана обладать наименьшей степенью потерь, предоставление которого добывается оптимальным подбором режима работы компонентов сети с учетом потребности потребителей в электроэнергии.

Необходимо реконструировать системы электроснабжения ПС 35 кВ «Советская» питающей 10 электродвигателей, аэродром, воздушную линию и другие потребители. В связи с моральным и физическим износом выключателей и разъединителей, необходимо заменить масляные выключатели на вакуумные и разъединитель наружной установки двухколоноковый на разъединители с полимерной изоляцией.

Нужно рассчитать нагрузки, выбрать силовые трансформаторы и однолинейные схемы подстанции, рассчитать токи КЗ. Произвести выбор электрооборудования для распределительного устройства 35 и 6 кВ. Также необходимо произвести расчет коммерческой эффективности и узнать за сколько лет окупается выбранное оборудование и для безопасности рассчитать заземляющее устройство трансформаторной подстанции и освещения рабочих мест.

Для расчета нагрузок подстанции нужно:

- посчитать мощность каждого потребителя  $P_{расч}$ , которая находится по расчету номинальной мощности, умноженной на коэффициент спроса;
- посчитать расчетную реактивную мощность всех потребителей  $Q_{расч}$ , которая находится по расчету  $P_{расч}$  умноженной на коэффициент мощности  $tg \varphi$ ;
- определить полную мощность каждого потребителей  $S_{расч}$  и сложить их.

Чтобы выбрать силовые трансформаторы нужно сначала выбрать компенсирующие устройства. Они уменьшают объем потребления реактивную мощность. Для выбора компенсирующего устройства необходимо знать её расчетную реактивную мощность (333,2 квар), тип и номинальному напряжению (6,3 кВ). По полученным значениям принимаются к две конденсаторные установки УКРМ-6,3-300-150 устанавливается на стороне 6,3 кВ. Выбираем силовой трансформатор ТМН-6300/35/6 У1 по расчётной мощности трансформатора с учётом потерь и компенсацией реактивной мощности. Его необходимо проверить, чтобы коэффициент загрузки в нормальном и послеаварийном режиме был меньше максимально допустимого коэффициента загрузки масляного силового трансформатора.

Также для питания нагрузок подстанции необходимо выбрать трансформатор собственных нужд. Для этого необходимо найти полную мощность всех потребителей собственных нужд, которая равняется 77,3 кВА. Из результатов расчетов на ПС 35/6 кВ «Советская», предусматривается установка двух ТЛС-СЭЩ-63/6/0,4.

Электрические схемы распределительных устройств рассматриваемой подстанции необходимо выбирать на основании рекомендаций, изложенных в СТО 56947007-29.240.30.010-2008. Учитывая типовые схемы и области их применения для напряжений 110 кВ и 10 кВ и с учетом количества присоединений на сторонах ВН и НН подстанции предусматриваются следующие схемы распределительных устройств [1]:

- при четырех присоединениях ОРУ 35 кВ (2 ВЛ 35 кВ и 2 силовых трансформатора) выполняется по схеме 35 – 4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической перемычкой со стороны линий» представленная на рисунке 1;
- при 2-х трансформаторах, присоединенных к одной секции выполняется по схеме 6-1 «Одна, секционированная выключателем, система шин» представленная на рисунке 2.

Достоинствами данной схемы являются:

- 1) простота исполнения;
- 2) нет необходимости в больших капиталовложениях;
- 3) удобство с точки зрения проведения техобслуживания и ремонтных работ;
- 4) возникновение аварии на СШ становится причиной отключения лишь одной секции и половины потребителей предприятия.

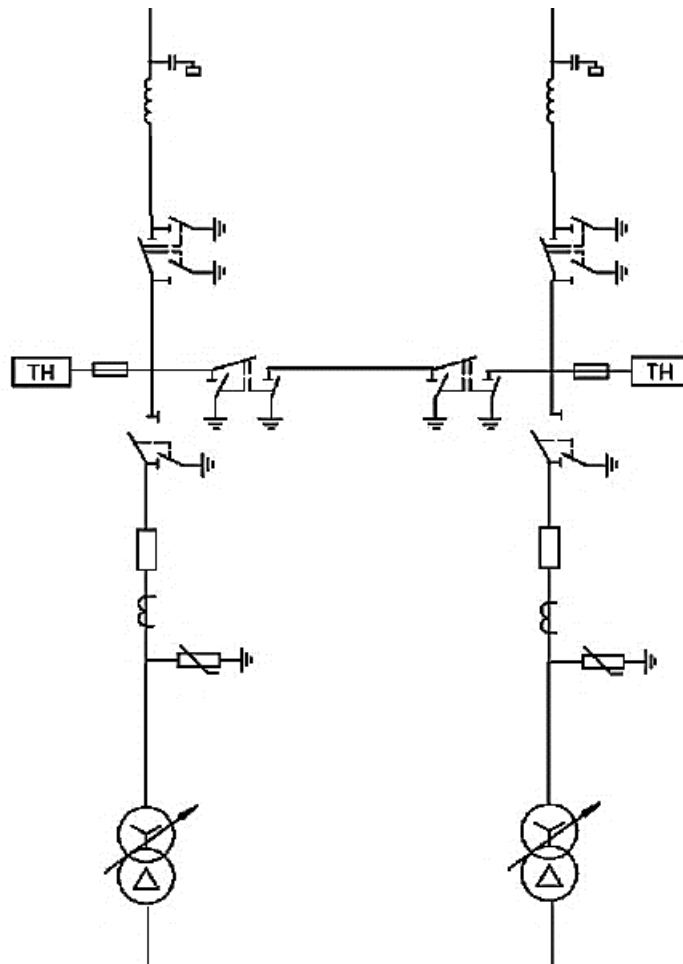


Рисунок 1 - Схема 35 – 4Н «Два блока с выключателями и неавтоматической переключкой со стороны линий»

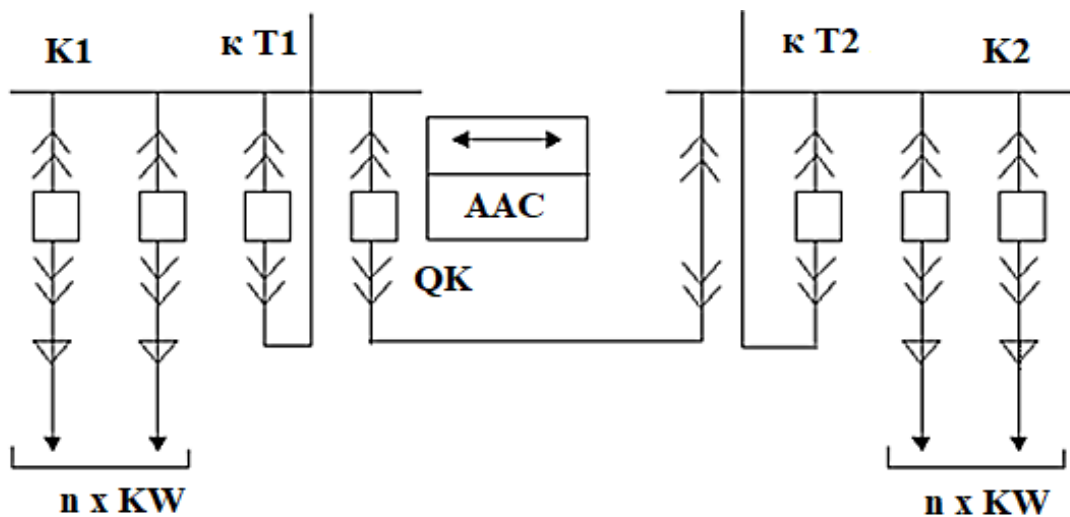


Рисунок 2 - Схема 6 – 1 «Одна, секционированная выключателем, система шин»

Токи КЗ рассчитываются в системе именованных единиц.

Одной из главных причин аварийных режимов в электрических установках являются 3-хфазные, 2-хфазные, 2-хфазные на землю и 1-нофазные КЗ.

Расчеты аварийных режимов при проектировании электроустановки необходимы для выбора аппаратуры подстанции и проверки токоведущих частей на их термическую и электродинамическую стойкость, и, кроме того, для расчета релейной защиты и заземляющего устройства.

Все элементы сети необходимо представить схемами замещения. На данных схемах приводим активные и индуктивные сопротивления элементов, по которым могут протекать токи КЗ. Схема замещения представлена на рисунке 3.

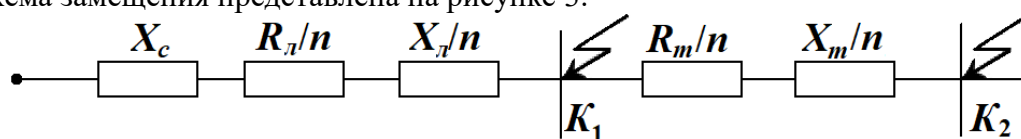


Рисунок 3 - Схема замещения для расчета токов КЗ

Для расчета находятся индуктивное сопротивление системы, активное сопротивление, реактивное сопротивление для питающей ВЛ 110 кВ и при КЗ на шинах 6,3 кВ, а также силового трансформатора. После этого находится итоговое сопротивление в точках  $K_1$  и  $K_2$ , по которым проводится расчет 3-х фазных токов на шинах 110 кВ и 10,5 кВ. По полученным данным находится ударный ток в каждой точке. Полученные расчеты необходимы для выбора электрооборудования подстанции “Советская”

Условия выбора электрооборудования для РУ 35 кВ и РУ 6 кВ в [2].

В выборе электрооборудования РУ 35 кВ производится выбор и замена выключателей масляных на вакуумные ВБПС-35-III-25/630 УХЛ1, разъединителей РЛНД на РГПЗ-СЭЩ-2-II-35/1000 УХЛ1. Также выбираются трансформаторы тока типа G1F-35 150/5, трансформаторы напряжения типа НАМИ-35 УХЛ1. Электрооборудования РУ 6 кВ отличается необходимостью выбора комплектного оборудования подстанции типа КРУ-СЭЩ-63-2-01В-1600/31,5 УЗ для него выключатели ВВ/TEL-10, трансформаторов тока ТЛК-10-1000/5-0,5/10Р-УЗ, трансформаторов напряжения ТН ЗНОЛ-6 -0,5/3-150/100-У2 и выбор токопровода ТЗК-10-1000-81УХЛ.

В результате проведенных расчетов были получены следующие показатели коммерческой эффективности [3]:

- чистый дисконтированный доход при принятой ставке дисконта 10 % за период расчета 5 лет в ценах по состоянию на 30.05.2028 г. является положительным и составляет 801,6 тыс. руб.;
- срок окупаемости 4,75 лет;
- срок окупаемости с учетом дисконтирования 5,92 года;

Металлические части электрических установок, которые нормально не находятся под напряжением, могут оказаться под ним из-за пробоя изоляции.

Защитное заземление подстанции выполняется с целью защиты персонала от напряжения прикосновения. Заземление нейтралей электрических установок является рабочим. Для защиты от молний применяют грозозащитное заземление.

При расчете заземляющего устройства было принято установить 33 вертикальных заземлителя и в качестве дополнительной меры по снижению напряжения прикосновения прием подсыпку гравием с толщиной слоя 20 см, с удельным сопротивлением 3000 Ом · м в рабочих местах, чтобы расчетное напряжение соприкосновения было меньше допустимого.

При расчете освещения были выбраны растровые светильники с 4-ю линейными люминесцентными лампами для освещения 9 рабочих мест. И чтобы осветить комнату 5x5x3 необходимо 7 светильников, а для 9 мест 63 штуки.

#### Библиографический список:

1. Блок, В.М. Электрические сети и системы [текст]: Учебное пособие / В.М. Блок. – М.: Высшая школа, 1999. – С. 307-312 с.
2. Пospelов, Г.А. Проектирование электроэнергетических сетей и систем [текст]: Учебное пособие / Г.А. Пospelов, В.Т. Федин. – Иваново: МЗЭТ ИЭК, 2006 - 286 с.
3. Мазурина, Е.В. Оценка экономической эффективности научно-технических решений в сфере электроснабжения и автоматизации промышленных установок и технологических комплексов [текст]: Методические указания / Е.В. Мазурина. – Ухта: УГТУ, 2014. – 83 с.
4. Пособие по расчету и проектированию естественного, искусственного и совмещенного освещения (к СНиП II-4-79) / НИИСФ. М.: Стройиздат, 1985. – 384 с.



Тетеревлева Е. В.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

**Аннотация.** Применение ограничителей перенапряжений нелинейных для эффективного снижения частоты отказов от грозовых перенапряжений на воздушной линии передачи получил широкое признание по сравнению с другими мерами молниезащиты. В этой статье представлены такие аспекты, как принцип работы ограничителей перенапряжений нелинейных и эффективность работы в качестве молниезащиты.

**Ключевые слова:** ограничители перенапряжений нелинейные, воздушные линии электропередачи, грозовые перенапряжения.

Надёжность работы энергосистемы в значительной мере определяется надёжностью работы воздушных линий ВЛ 6-35 кВ. Одной из основных причин аварий и нарушений питания на воздушных линиях являются грозовые перенапряжения, которые составляют от 40% до 70% от общего числа их отключений. Они вызывают повреждения изоляторов, опор, проводов, приводят к замыканиям на землю, дуговым перенапряжениям и автоматическим отключениям.

В России действует два основных нормативных документа в которых описываются мероприятия и указания по защите воздушных линий от перенапряжений: «Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений» и «Методические указания по применению ограничителей в электрических сетях 110-750кВ».

Для уменьшения количества аварий, связанных с грозовыми перенапряжениями, используются методы, которые включают в себя улучшение уровня изоляции линии, снижение сопротивления заземления, уменьшение угла защиты и т. д. Однако способ, связанный с улучшением уровня изоляции линии, заметно увеличивает стоимость линии, а уменьшить сопротивление заземления бывает чрезвычайно трудно в областях с высоким удельным сопротивлением почвы. В то же время способ уменьшения угла защиты часто ограничен конструкцией опор. Опыт эксплуатации показал, что до сих пор не существует очень хороших мер предупреждения и значительного снижения количества грозовых аварий на линиях электропередачи, расположенных на сложной холмистой местности и в районах с высоким удельным сопротивлением почвы. Поэтому в некоторых странах с 1980 года на воздушных линиях электропередачи в качестве меры по уменьшению аварий от грозовых перенапряжений предусматривается установка ограничителей перенапряжений нелинейных на основе оксида цинка. В США и Японии данные ограничители перенапряжения также успешно применялись на воздушных линиях электропередачи. Опыт эксплуатации доказал, что использование ограничителей перенапряжений нелинейных для защиты от грозовых перенапряжений в областях с высоким удельным сопротивлением почвы может эффективно улучшить уровень грозостойкости воздушных линий.

Оснащение ограничителей перенапряжений нелинейных искровыми промежутками позволяет исключить воздействие на ограничитель рабочего напряжения промышленной частоты и воздействие коммутационных перенапряжений (искровые промежутки настраивают так, чтобы они не срабатывали при коммутационных перенапряжениях). Когда молния непосредственно поражает опору, часть тока молнии протекает через заземляющий провод к соседней опоре, другая часть молнии течет в землю через опору, сопротивление заземления опор проявляется переходной характеристикой сопротивления, это обычно характеризуется по сопротивлению импульсного заземления. Электрический потенциал траверсы быстро увеличивается при ударе молнии в опору, его значение потенциала равно [1]:

$$V_i = iR_i + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

где  $i$  - ток молнии,  $R_i$  - импульсное сопротивление заземления,  $L \frac{di}{dt}$  - составляющая переходного состояния.

Когда разность потенциалов траверсы ( $V_t$ ) и линейного индуцированного потенциала ( $V_l$ ) составляет более 50% напряжения разряда изоляционной гирлянды ( $U_{50\%}$ ),  $V_t - V_l = U_{50\%}$ , перекрытие будет происходить от траверсы к линии. Если учесть амплитуду напряжения промышленной частоты ( $U_m$ ), то она составит  $V_t - V_l - U_m = U_{50\%}$ .

Таким образом, уровень устойчивости к ударам молнии связан с четырьмя важными факторами, такими как 50%-ное напряжение разряда гирлянды изоляторов, ток молнии, контактный заземляющий провод и сопротивление импульсного заземления опоры.

Снижение сопротивления заземления опоры является основной мерой по повышению уровня грозостойкости воздушной линии электропередачи без использования ограничителей перенапряжения для защиты от перенапряжений. В частности, очень сложно снизить сопротивление заземления в горах, что приводит к частым отключениям воздушной линии при ударах молнии. Ограничитель перенапряжения устанавливается параллельно изолятору. Когда в линию передачи попадает молния, часть тока молнии протекает через заземляющий провод к соседней опоре, другая часть тока молнии течет в землю через опору. Когда ток молнии превышает значение срабатывания ограничителя перенапряжения, ток будет течь через ограничитель. После протекания тока молнии, ток постоянной частоты, протекающий через ограничитель, составляет только уровень в несколько мА, ограничитель отключит постоянный ток частоты при первом переходе через ноль, поэтому электрическая прочность диэлектрика быстро восстановится.

Таким образом, ограничитель перенапряжения для защиты от грозового перенапряжения играет важную роль в удержании потенциала, предотвращая пробоя изолирующей гирлянды, тем самым достигая цели, предотвращающей аварию линии передач от молнии.

Линия напряжением 35кВ относится к сети среднего напряжения и является одной из самых распространенных в России. Распределительная сеть имеет низкий уровень изоляции и сложную сеть конструкции, также нет заземляющего провода, муфты заземления, ограничителей и других защитных мер. Так что, отключение воздушной линии может быть легко вызвана прямым попаданием молнии или индукционной молнией в период гроз. Уровень грозоустойчивости линий электропередачи – это важные показатели для измерения эффекта защиты от молнии, это касается размера опоры, импульсного сопротивления заземления, количества изоляторов, типа изоляторов, местности вокруг опоры, эксплуатации и уровня обслуживания и так далее.

Когда в линию передачи попадает молния, ток молнии течет через провода в обе стороны от опоры. До отраженного формирования волны, соотношение напряжения и тока линии представляет собой характеристический импеданс  $Z$ . Импеданс воздушной линии при атмосферном перенапряжении равно почти 400 Ом.

Когда поражается линия передачи от молнии, ток молнии  $I$ , который вызывает перекрытие колонны изолятора будет равен [1]:

$$I = U_{50\%} / 100 \quad (2)$$

Где  $U_{50\%}$  - это величина 50% разрядного напряжения гирлянды изолятора.

Напряжение пробоя трех изоляторов составляет обычно  $117,36 \times 3 = 352,08$  кВ.

Ток молнии в этом случае, который вызывает перекрытие гирлянды изолятора, составляет 3,52кА.

В соответствии с амплитудой тока молнии формула накопительной вероятности будет равна [1]:

$$\lg P = -I / 88 \quad (3)$$

где  $I$  - амплитуда тока молнии кА;  $P$  - вероятность того, что амплитуда тока молнии превышает  $I$ .

С помощью этой формулы получим вероятность  $P = 91\%$ , это означает, что с вероятностью в 91% молния вызовет отключение линии, если линия будет поражена молнией.

Согласно нормативной документации, когда разряд молнии попадет в землю на расстоянии не более 65 метров от воздушной линии, то в ней будет генерироваться напряжение

[2]. Максимальное значение индуцированного напряжения может быть рассчитано следующим образом [1]:

$$U_g = 25 \frac{I \cdot H_c}{S} \quad (4)$$

где  $U_g$  - максимальное напряжение от молнии, кВ;  $I$  - амплитуда тока молнии (обычно не более 100), кА;  $H_c$  – средняя высота троса, м;  $S$  - расстояние между молнией и проводом, м.

В соответствии с формулой перенапряжение вызванное молнией пропорционально средней высоте воздушной линии. Наведенное напряжение обычно не более 300 кВ, однако, легко может произойти пробой изолятора из-за наведенного напряжения в распределительной сети 35 кВ и ниже [3].

Вывод. Обеспечение молниезащиты линии электропередачи при помощи ОПН получило широкое признание относительно других мер молниезащиты. Особенно ограничители перенапряжения могут значительно уменьшить угрозу возникновения аварии от грозовых перенапряжений на линиях электропередачи в сложной местности и зонах с высоким удельным сопротивлением грунта. В настоящее время промышленность стремительно развивается. Большое количество линий вводится каждый год, увеличение длины воздушных линий увеличивает вероятность поражения молнией. С точки зрения технической экономики, не на все опоры можно установить ограничители перенапряжений, поэтому мы предлагаем выборочно устанавливать ограничители перенапряжений в тех местах где наиболее высока вероятность поражения воздушной линии молнией. При этом установка большого количества ограничителей в определенной степени усложняет обслуживание воздушной линии, поэтому необходимо строго контролировать количество устанавливаемых ограничителей.

#### **Библиографический список:**

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 320 с. –ISBN 5-9221-0082-3.
2. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений/Под научной редакцией Н.Н.Тиходеева. –2-е изд. –СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999. –355 с.
3. Базуткин В.В., Кадомская К.П., Костенко М.В., Михайлов Ю.А. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. Учебник для вузов. –СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 1995. –320 с. –ISBN 5-283-04423-8.

УДК 621.316

#### **Особенности управления электроприводами компрессорных установок при нарушениях в системах электроснабжения**

Тетеревлева Е. В., Отев К. С.

Ухтинский государственный технический университет, г.Ухта, Россия

**Аннотация.** Предложен оптимальный выбор управляемого синхронного двигателя в электроприводах компрессоров. Рассмотрено применение быстродействующих возбудителей с автоматическим регулированием возбуждения.

**Ключевые слова:** электрический привод; синхронный двигатель; управление электроприводами компрессоров, автоматическое регулирование возбуждения.

Из результатов анализа структуры потребления электроэнергии по отраслям промышленности установлено, что основная доля приходится на электроприводы (ЭП). Среди турбомеханизмов приводы центробежных насосов, вентиляторов, компрессоров занимают доминирующее положение. Основная часть этих ЭП действует в вентиляционных установках, компрессорных и водонасосных станциях, промышленных предприятий, магистральных газо- и нефтепроводах. Они составляет значительную долю механизмов промышленных предприятий, в том числе, металлургических и горнодобывающих [2].

Регулирование напора и подачи воздуха в компрессорных установках часто осуществляется перемещением задвижек нагнетательного трубопровода при постоянной скорости электродвигателя или изменением числа работающих механизмов, что приводит к значительным потерям энергии и ресурсов. В настоящее время наблюдается устойчивая тенденция применения в различных отраслях промышленности частотно-регулируемых ЭП со стандартным асинхронным двигателем (АД). Наиболее значимые результаты их использования предполагаются в сфере создания технологических систем водо-, воздухо- и теплоснабжения. Экономический эффект обуславливается энергосбережением в самом ЭП и ресурсосбережением в технологических системах, где устанавливается такой ЭП. Ресурсосбережение определяется как стоимостная оценка дополнительных преимуществ: уменьшения износа технологического оборудования; снижения потерь получаемого продукта [5].

Электроприводы компрессорных установок в литературе рассматриваются как синхронные. Появление на мировом рынке современных преобразователей частоты позволяет перевести нерегулируемые синхронные электроприводы в регулируемые для более рационального использования ресурсов и экономии энергетических затрат [1, 4]. Реальные характеристики компрессоров могут быть получены только при совместном анализе характеристик компрессора и сети, на которую он работает. Характеристика сети показывает, какое давление должно быть создано компрессором в начале сети для перемещения по ней определенного количества воздуха. Это давление складывается из двух составляющих: статического давления, идущего на преодоление противодействия в воздухохранильнике, и динамического давления, необходимого для преодоления гидродинамического сопротивления сети [2].

Перевод существующих нерегулируемых электроприводов компрессоров на базе синхронных двигателей (СД) по технико-экономическим показателям должен быть на регулируемые ЭП с преобразователем частоты. Однако возрастают требования и к регулируемым электроприводам в отношении единичной мощности, энергетических показателей, перегрузочной способности, качества регулирования скорости. Такая тенденция объясняется рядом причин: увеличением мощности технологических агрегатов, ростом их производительности, повышением требований к качеству продукции, упрощением механического оборудования и передачей многих его функций электроприводу. Одновременно расширяется область применения регулируемых электроприводов для принципиально новых рабочих машин, либо таких рабочих машин, которые ранее работали без регулирования скорости [5].

Каждый из видов двигателей переменного тока имеет свою целесообразную область практического применения в регулируемых электроприводах. Для СД такой областью являются, прежде всего, средняя и большая мощности (с номинальным моментом более 3 Н·м) с небольшим диапазоном регулирования скорости. Как показывает длительный срок использования на компрессорных установках машин переменного тока с нерегулируемой скоростью, в этой области СД имеет неоспоримые преимущества по сравнению с асинхронным [2].

В регулируемых ЭП проявляются также дополнительные преимущества СД: повышенная управляемость; возможность выполнить как тихоходные, так и быстроходные приводы на основе преобразователя частоты с естественной коммутацией. При малом диапазоне регулирования скорости СД оказывается предпочтительным и в тех случаях, когда затруднительно создание машин двойного питания (приводы большой мощности и частоты вращения) [3].

Применение регулируемых синхронных ЭП началось с видов рабочих машин, где до этого использовался нерегулируемый ЭП на основе СД, питаемых от сети. В этих рабочих машинах переход к регулируемому ЭП давал значительный технологический и конструктивный эффект. Быстроходные ЭП компрессоров позволяют наиболее экономично регулировать производительность при изменениях технологических режимов, исключают недостаточно надежные повышающие редукторы. Эти требования являются определяющими при разработке ЭП компрессоров. При групповой работе компрессоров, где ЭП, работают с постоянной производительностью при питании от сети, СД имеют возможность регулировать выработку количества реактивной мощности по каналу возбуждения [1, 3].

Рассмотрим регулирование СД по каналу возбуждения. В системе электроснабжения СД может быть использован также и как генератор реактивной мощности, а наличие возмущающих воздействий приводит к отклонению параметров питающей сети и СД от их номинальных или оптимальных значений. Это снижает технико-экономические показатели синхронных ЭП и вызывает колебания напряжения и частоты питающей сети. Поэтому системы управления синхронных ЭП должны обеспечить, с одной стороны, устойчивую работу самого ЭП, с другой, стабилизацию параметров питающей сети системы электроснабжения [3].

Это определило применение быстродействующих возбудителей с автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) в синхронных ЭП. В установившихся и переходных режимах работы питающей сети и синхронного ЭП устройства АРВ обеспечивают различные законы регулирования параметров. Требования систем электроснабжения в установившихся режимах постоянного уровня напряжения и компенсации реактивной мощности определило использование АРВ СД. АРВ в динамических режимах обеспечивает качество регулирования, определяет мгновенные значения регулируемых параметров в переходных процессах для обеспечения точности стабилизации регулируемого параметра и надежности работы. Качество регулирования также предусматривает: демпфирование качаний ротора при набросах и сбросах нагрузки в ЭП, работающих с резкопеременными нагрузками и повышение динамической устойчивости ЭП, высокое быстродействие АРВ [4].

Автоматическое регулирование возбуждения в установившихся режимах работы обеспечивается по одному из следующих законов [3]: постоянство  $\cos\varphi$  двигателя ( $\cos\varphi=const$ ); постоянство реактивной мощности, вырабатываемой СД ( $Q=const$ ); постоянство напряжения в узле нагрузки (в системе питания  $U_n=const$ ); постоянство  $\cos\varphi_n$  в узле нагрузки (в системе питания  $\cos\varphi_n=const$ ). Для ЭП компрессоров большой и средней мощности с плавно изменяющейся нагрузкой целесообразен закон регулирования  $\cos\varphi_n=const$  при незначительных колебаниях напряжения питающей сети.

Современные синхронные ЭП с регулированием скорости имеют определенную общность в отношении состава, взаимосвязи основных частей, принципа действия. [1] Эти черты отражены в функциональной схеме рис.1. [3]. Обмотка якоря двигателя  $M$  питается от полупроводникового преобразователя частоты  $UF$ , обмотка возбуждения – от полупроводникового возбудителя  $ME$ , управление преобразователем частоты (ПЧ) и возбудителем осуществляет устройство автоматического регулирования  $ACL$ . В это устройство вводится задание скорости ЭП  $ACH$  от вышестоящей системы автоматического управления скоростными режимами технологического агрегата [2]. В устройство регулирования поступает информация о положении ротора двигателя от датчика положения ротора  $BG$ , механически сочлененного с двигателем, а также об электрическом состоянии двигателя от датчиков тока якоря  $UA$  и возбуждения  $UAE$  (или других датчиков) [4].

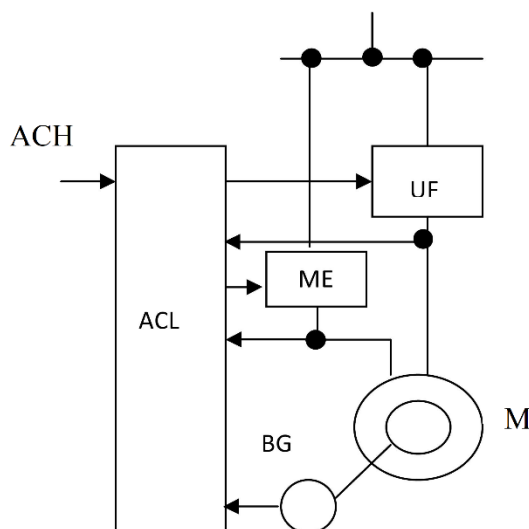


Рисунок 1 - Общая функциональная схема регулируемого электропривода с СД

### **Библиографический список:**

1. Туркин, М.А. Энергосберегающий синхронный электропривод при вентиляторной нагрузке [Текст] М.А. Туркин//Материалы докладов V Всероссийской научно-практической конференции «Ресурсосбережение и экологическая безопасность».– Смоленск, 2006.–с.31-34.
2. Онищенко, Г.Б. Электропривод турбомеханизмов [Текст] / Г.Б. Онищенко, М.Г. Юньков. М.: Энергия, 1972.–240с.
3. Вейнгер, А.М. Регулируемый синхронный электропривод [Текст] А.М. Вейнгер// М.: Энергоатомиздат, 1985.–224с.
4. Беляев, А.Н. Проектирование адаптивных автоматических регуляторов возбуждения с помощью нейронечеткого моделирования [Текст] / А.Н. Беляев, С.В. Смоловик// Электричество, 2003. № 3.–с.2-9.
5. Инжиниринг электроприводов и систем автоматизации: учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / [М.П. Белов, О.И. Зементов, А.Е. Козярук и др.]; под ред. В.А. Новикова, Л.М. Чернигова.– М.: Издательский дом «Академия», 2006.–368с.

УДК 621.311.68

### **Использование автономных источников энергии блочно-модульного типа на предприятиях нефтегазовой отрасли**

Агеев А. Э.

Научный руководитель - Тетеревлева Е. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

Высокий уровень добычи нефти и газа сопровождается их нерациональным использованием, когда производственные предприятия обращают внимание только на товарный продукт или товарный выпуск, тогда как вторичный выпуск, в частности, попутного нефтяного газа, используется неэффективно. Неэффективное использование недр в процессе добычи нефти обусловлено устареванием организационных и технологических процессов и несовершенством экономического анализа. Учитывая, что система электроснабжения является важной частью процесса разработки и эксплуатации нефтяных месторождений, она оказывает значительное влияние на энергетические и экономические показатели промышленности. Поэтому актуальной задачей является повышение эффективности системы электроснабжения с экономической точки зрения.

Использование попутного нефтяного газа может одновременно решить по меньшей мере два вопроса: высокие штрафы за сжигание попутного газа и энергоснабжение промышленности с высокой надежностью и энергоемкостью.

Истощение нефтяных месторождений вынуждает предприятия переносить производство в отдаленные, труднодоступные районы. Поэтому новые объекты строительства нефтедобычи расположены в районах Крайнего Севера и Восточной Сибири, где отсутствует централизованное электроснабжение в большинстве неразработанных нефтяных районов, что подталкивает к использованию различных типов автономных источников энергии. Нефтегазовая промышленность отличается высокой энергоемкостью, затраты на энергоносители в стоимости продукции для всей вертикали нефтяной промышленности нередко составляют более 50 процентов.

На рисунке 1 представлена карта электрификации России.

Электроснабжение нефтегазовой промышленности может осуществляться от централизованной сети электроснабжения или автономной электростанцией. Следует отметить, что увеличение доли затрат на электроэнергию в совокупных издержках производства вынуждает промышленные предприятия искать новые возможности для электроснабжения и теплоснабжения. В то же время для многих нефтяных месторождений отсутствует возможность подключения к централизованной системе электроснабжения. Строительство воздушных линий для таких районов требует значительного времени и, чаще всего, экономически нецелесообразно из-за огромного объема капитальных затрат. Рост тарифов на электроэнергию также увеличивает долю расходов на энергию в бюджете нефтегазовых компаний.

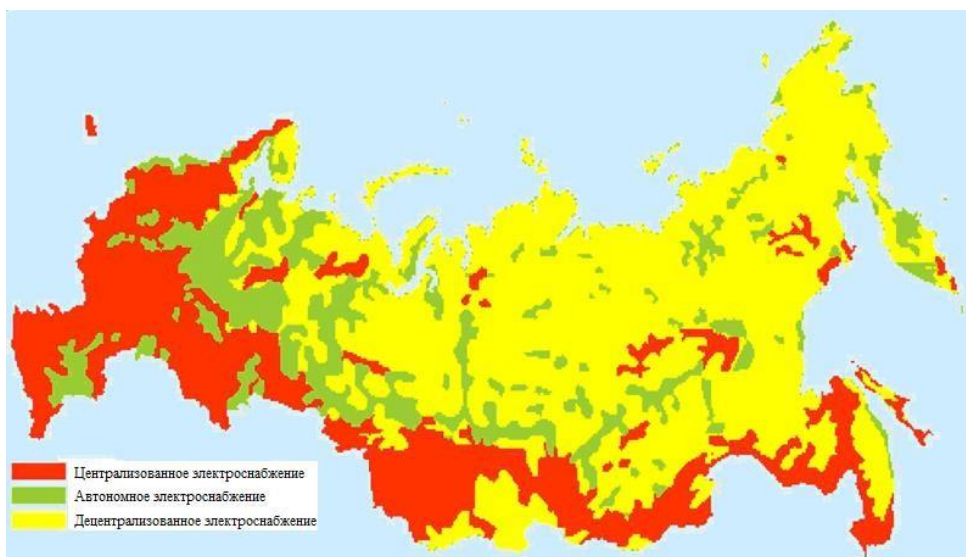


Рисунок 1 – Карта электрификации России

Значительная экономия энергии, связанная с использованием попутного нефтяного газа (ПНГ) с целью генерации собственного электричества, а также комбинированная выработка тепла (когенерация) достигается за счет внедрения автономных источников энергии. Для этой цели широко разработаны автономные системы электроснабжения на базе газопоршневых и газотурбинных электростанций. Кроме того, дизельные электростанции широко используются в отдаленных районах. Опыт показал, что наиболее выгодными решениями являются быстровозводимые блочно-модульные электростанции на основе конструкций контейнерных типов с выходной мощностью до 50 МВт. [1, 2, 3]

#### *Дизельные электростанции.*

Дизельная электростанция - генераторная установка, в которой дизельный двигатель используется в качестве приводящего вала в движение устройства для генерирования электроэнергии. Дизельные электростанции широко используются в качестве резервных источников энергии в нефтегазовой промышленности, особенно для снабжения потребителей первой и второй категорий. Во время отключения электроэнергии дизельные генераторы работают для покрытия требуемого спроса.

#### Преимущества:

- конструкция и компоновка установки достаточно просты;
- возможность быстрого пуска, набор нагрузки за короткое время;
- требуется относительно небольшое количество воды для охлаждения;
- общая стоимость намного меньше, чем стоимость паровой электростанции той же мощности;
- тепловой КПД установки выше, чем у паровой электростанции (35%).

#### Недостатки:

- высокие эксплуатационные расходы, поскольку топливо (дизельное топливо) является дорогостоящим;
- станция не работает удовлетворительно в условиях перегрузки в течение длительного периода времени;
- станция ограничена относительно небольшой мощностью;
- стоимость смазочных материалов и обслуживания высока.

Дизельные электрогенераторы обеспечивают резервное питание основным объектам и технологическим процессам компании. В случае аварийной ситуации или катастрофы, если основная мощность отключена, генераторы могут выступать в качестве резерва, что позволяет продолжать производство в обычном режиме. Это может спасти предприятие от потери большого количества времени и прибыли. [3]

#### *Газовые электростанции.*

Газовые электростанции - электростанции, предназначенные для автономной или резервной выработки электроэнергии путем сжигания газа различных видов. Делятся на два основных типа: газопоршневые и газотурбинные установки. Оба вида имеют структурные и функциональные различия, которые определяют степень их использования и возможности установки на конкретном объекте. После анализа особенностей объекта, плюсов и минусов каждого типа, представляется возможным выбор типа установки.

Целесообразно применять попутный нефтяной газ (ПНГ) в качестве топлива для автономных установок по производству электроэнергии. ПНГ хранится в растворенном состоянии в композиции сырой нефти, выделяясь из нее по мере извлечения на поверхность. Несмотря на то, что газ является важным сырьем в нефтехимии и ценным топливом в электроэнергетике, Российская Федерация занимает первое место в мире по объемам сжигания ПНГ на факельных установках. Согласно официальной статистике, в 2011 году в России было сожжено 26,7 млрд. м<sup>3</sup> ПНГ, однако, по оценкам Всемирного фонда «World Wide Fund for Nature space monitoring», было уничтожено не менее 38 млрд. м<sup>3</sup> (рисунок 2). [2, 5, 6]

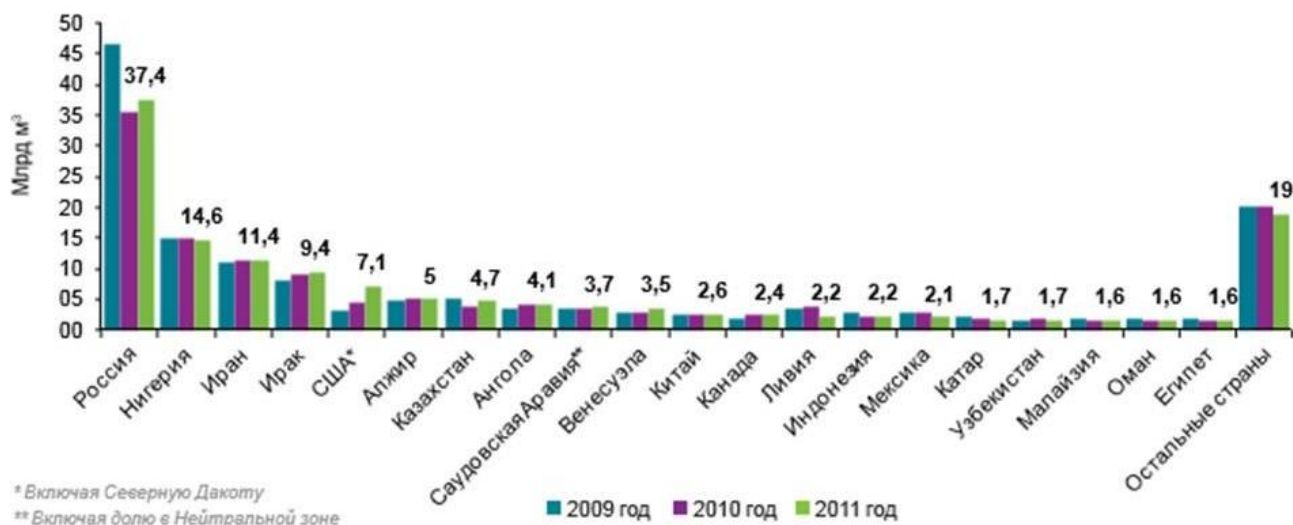


Рисунок 2 – Объемы сжигания ПНГ на основе спутниковых данных

Сжигание ПНГ приводит не только к огромным финансовым потерям из-за не востребованного углеводородного сырья, но также к значительным выбросам твердых загрязнителей и ухудшению экологической ситуации внефтепромыслах.

Соответственно, выработка электроэнергии при использовании попутного нефтяного газа является одним из наиболее перспективных подходов к решению энергетической проблемы удаленных производственных объектов.

Применение газовых электростанций открывает широкие возможности для эффективного использования попутного нефтяного газа и снижения себестоимости электроэнергии в 2-3 раза по сравнению с сетевыми тарифами, что приводит к значительному снижению энергоемкости добычи нефти в целом. [3, 4]

#### Газопоршневые электростанции.

Газопоршневая электростанция (ГПУ) - это генерирующая установка, которая управляется двигателем внутреннего сгорания, работающим на газе.

#### Достоинства:

- конкурентная цена установки;
- коэффициент полезного действия составляет в среднем 40 % и стабилен по отношению к изменению нагрузки;
- умеренный средний удельный расход топлива;
- время запуска ( $\approx 5$  мин.);
- неограниченное количество пусков.

#### Недостатки:

- стоимость капитального ремонта достигает 70-90 % от стоимости установки;



- ограниченное время работы на холостом ходу;
- высокие затраты на эксплуатацию;
- требовательность к смазочным работам;
- трудный холодный пуск;
- высокий уровень выбросов в атмосферу, шума.

При необходимости, работа нескольких газопоршневых электростанций может быть синхронизирована, чтобы получить требуемую мощность и равномерно распределить рабочую нагрузку. Параллельная работа газопоршневых электростанций с сетью может выполняться параллельно с нагрузкой или индивидуально с различной мощностью, где это необходимо для обеспечения различной номинальной мощности. Это позволяет достичь требуемой выходной мощности и варьировать нагрузку.

Газопоршневые электростанции требуют высокого качества топлива, поэтому их использование может привести к множеству трудностей. Высокий риск детонации не позволяет использовать их на месторождениях с низким качеством топлива или содержанием сероводорода более 0,1 % без создания предварительной системы подготовки газа, что значительно увеличивает капитальные затраты на газопоршневые электростанции. Газопоршневая электростанция часто работает с нагрузкой не более 40-60% от номинальной мощности из-за высокого риска детонации топлива. Это приводит к увеличению затрат на обслуживание оборудования и быстрому выходу установки из строя. [1, 3, 4]

#### *Газотурбинные электростанции.*

Генераторная станция, которая использует газовую турбину в качестве первичного вращателя вала для генерации электрической энергии, известна как газотурбинная электростанция. В газовой турбине в качестве рабочего тела используется воздух. Воздух сжимается компрессором и подается в камеру сгорания, где тепло добавляется в воздух, повышая тем самым его температуру. Горячий и высоконапорный воздух из камеры сгорания проходит в газовую турбину, расширяется и выполняет механическую энергию.

#### Достоинства:

- меньшая стоимость капитального ремонта (10-20 % от стоимости установки);
- эксплуатационные расходы намного ниже, чем для эквивалентной паровой электростанции;
- требует меньший объем воды;
- стоимость обслуживания меньше, по сравнению с газопоршневыми станциями;
- легкий холодный пуск;
- малы потери холостого хода;
- меньший уровень вибрации и шума.

#### Недостатки:

- КПД строго зависит от нагрузки;
- высокий уровень потребления топлива;
- время запуска ( $\approx 15$  мин.).

Применение газотурбинных электростанций дает возможность организовать надежное и экономичное электроснабжение нефтегазовых месторождений. Блочно-модульная конструкция установок повышает надежность установки и дает возможность включать и выключать отдельные агрегаты от эксплуатации без прерывания работы всей электростанции. [3, 4]

#### *Блочно-модульное исполнение автономных электростанций.*

Газовые электростанции могут поставляться в модульных зданиях или контейнерах. Приобретение газовых электростанций в модульном исполнении позволяет заказчику наращивать электрические мощности по мере необходимости, что позволяет использовать энергетические мощности наиболее полно. Располагаясь рядом с потребителем, блочно-модульные газовые электростанции имеют электросети малой протяженности. Подобные электрические сети менее подвержены различным внешним воздействиям, что повышает надежность энергоснабжения.

Мощность газовых электростанций легко увеличивать, так как сопряжение новых модулей, и последующий монтаж осуществляются быстро и технологично.

Газовые электростанции способны работать при 40-50 % нагрузке, сохраняя высокий электрический КПД. Для получения максимальной гибкости в эксплуатации, газовая электростанция может устанавливаться с дополнительным модулем, который запускается для снятия пиковых нагрузок.

В основу устройства газотурбинного агрегата положен принцип модульности: ГТУ состоят из отдельных блоков, включая блок автоматики. Модульная конструкция позволяет в кратчайшие сроки производить сервисное обслуживание и ремонт, наращивать мощность, а также экономить средства за счет того, что все работы могут производиться быстро на месте эксплуатации.

Таким образом, блочно-модульное исполнение автономных электростанций является наиболее оптимальным решением для питания отдаленных объектов нефтегазовой отрасли.

### **Библиографический список:**

1. Абрамович Б. Энергоснабжение нефтегазовых предприятий: учебное пособие. Санкт-Петербург: СПб, 2008.
2. Niemi S. Survey of modern power plants driven by diesel and gas engines. Finland: Espoo, 1997.
3. Sheldrake A. Handbook of electrical engineering: for practitioners in the oil, gas, and petrochemical industry. England: WILEY, 2003.
4. Meherwan P. Gas Turbine Engineering Handbook. Fourth edition. UK: Elsevier 2012.
5. Филиппов А. Попутный нефтяной газ нужен России. Москва: Neftegas.RU, 2013. - Режим доступа: [http://energ.ru/files/smi/maketi/13.06\\_png-1.pdf](http://energ.ru/files/smi/maketi/13.06_png-1.pdf). – (Дата обращения: 01.03.2023)
6. Кутепова Е., Книжников А. Проблемы и перспективы использования попутного нефтяного газа в России. Москва: WWF 2012.

УДК 621.3.018.783.3

### **Влияние гармоник тока и напряжения на системы электроснабжения**

Андреев М. А., Андреев Д. И.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье были рассмотрены задачи и практические методы, обеспечивающие эффективность фильтрации гармоник. Дана оценка влияния высших гармоник на электрооборудование предприятий и способов борьбы с ними. Анализируются различные виды искажений, вносящиеся нелинейными нагрузками, влияющие на качество электроэнергии.

**Ключевые слова:** гармоники, электроэнергия, показатели качества электроэнергии.

Одной из самых актуальных задач современного электроснабжения является повышение качества электроэнергии. Термин «качество электроэнергии» стал одним из основных в электроэнергетике.

Наибольший вклад в гармонический состав токов и напряжений вносят неуправляемые выпрямители, которые обычно являются частью блоков питания бытовых электроприборов или промышленного оборудования. Основными источниками гармоник являются нелинейные нагрузки.

Важным свойством гармоник является то, что они, как правило, накапливаются в энергосистеме. Вклад различных источников гармоник в некоторой степени суммируется. Этим гармоники сильно отличаются от эффектов высокочастотной электромагнитной совместимости. Высокочастотные помехи, протекая через образовавшиеся паразитные контуры, наибольшее влияние оказывают на линии данных и измерительные цепи. Они имеют тенденцию быть локализованными и незначительно кумулятивными.

Подробные многолетние исследования [2] форм кривых напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий (рис. 1) показывают, что во многих случаях вследствие наличия высших гармоник кривые напряжения принимают заостренную форму, поэтому высшие гармоники приводят к ускоренному старению изоляции электрических машин, силовых трансформаторов.

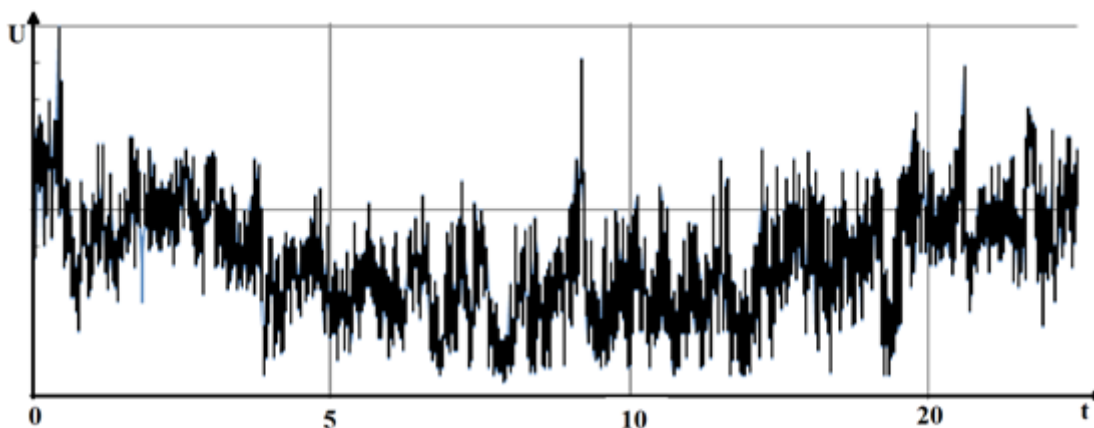


Рисунок 1 – График показателей гармонической составляющей на предприятии

В результате длительного исследования работы батареи конденсаторов с изоляцией, пропитанной минеральным маслом, при стабильных условиях эксплуатации установлено, что при коэффициенте гармонических составляющих напряжения  $K_U = 5\%$  спустя два года эксплуатации тангенс угла диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  конденсатора увеличился в два раза.

Реальная часто встречающаяся форма напряжения показана на рис. 2, а в сравнении с идеальной (основной) синусоидальной (рис. 2, б).

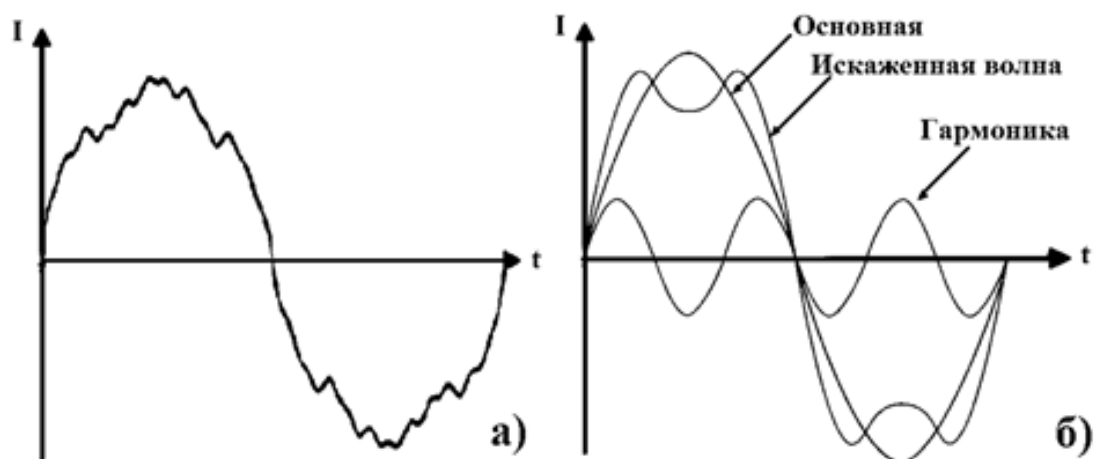


Рисунок 2 – Форма напряжения реально встречающаяся (а) и идеальная синусоидальная (б)

Воздействие высших гармоник на систему импульсно-фазного управления (СИФУ) вентильного преобразователя может привести к так называемому явлению гармонической неустойчивости, которое заключается в возникновении на выводах многоимпульсного преобразователя напряжений четных гармоник и/или гармоник, кратных трем, с высокой амплитудой, т. е. появлению неканонических гармоник для многоимпульсного преобразователя. Искажение напряжения может оказаться настолько существенным, что может привести к нарушению процесса коммутации вентилей, а значит, к нестабильному состоянию СИФУ в целом.

В качестве полезного применения высших гармоник стоит указать на системы сигнализации однофазных замыканий на землю. В системах электроснабжения 6 – 10 кВ промышленных предприятий предусматривается компенсация емкостного тока однофазного замыкания на землю посредством дугогасящих устройств, поэтому при резонансной настройке этих аппаратов использование емкостного тока замыкания промышленной частоты не представляется возможным. В связи с этим, принцип действия систем сигнализации однофазных замыканий на землю основан на естественной или искусственной генерации высших гармоник тока замыкания на землю, что позволяет обеспечить требуемые чувствительность и селективность работы сигнализации. Данные системы получили широкое распространение на промышленных предприятиях.

Рассмотрим распределение источников гармоник. Нелинейные нагрузки, нашедшие широкое применение в жилом комплексе, – это источники питания телевизоров, персональных компьютеров, различных электроприборов бытовой техники. Главное свойство такого вида потребителей заключается в том, что большая часть нелинейных нагрузок является однофазной с небольшой мощностью и распределена по электросети. Такая нагрузка генерирует токи резко несинусоидальной формы. Рост нелинейных нагрузок в жилом секторе является одной из основных причин ухудшения качества электроэнергии. Из-за распределенного характера нелинейной нагрузки применение фильтрокомпенсирующих устройств в таких электросетях представляет значительную техническую проблему и требует значительных капитальных вложений. На рис. 3 и 4 отражено распределение источников гармонических искажений по вышеперечисленным группам потребителей на 2015 и 2017 годы.



Рисунок 3 – Распределение источников гармонических искажений в 2015 г.

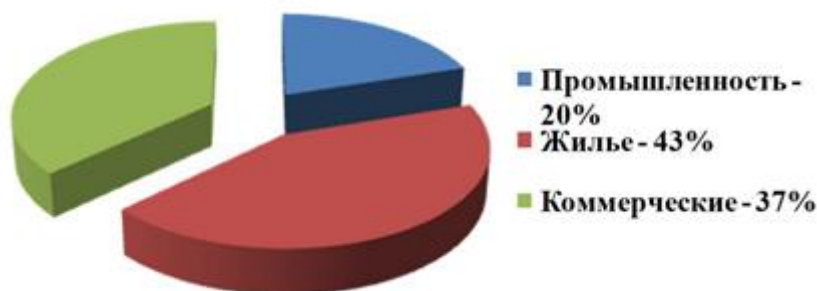


Рисунок 4 – Распределение источников гармонических искажений в 2017 г.

Из диаграмм становится понятным, что повышение числа однофазных нелинейных нагрузок у коммерческих потребителей и в жилом секторе является значительной причиной ухудшения качества электроэнергии. Особенностью таких систем являются большие уровни токов нейтрального провода даже при использовании симметричной нагрузки. Основными являются составляющие, имеющие частоту третьей гармоники, а они суммируются в нейтральном проводе. Все это приводит к повышению неконтролируемых потерь, а в некоторых случаях к авариям, вызванным обгоранием нейтрального провода, а также к дополнительному нагреву обмоток трансформаторов и повреждению их изоляции.

Компенсация высокочастотных гармоник тока происходит посредством обеспечения фазовых сдвигов углов тока, протекающих или в расщепленных вентильных обмотках трансформатора, или в сетевых обмотках нескольких трансформаторов, функционирующих на общие шины. Повышение пульсности выпрямителя с 6 до 12 приведет к изменению последовательности гармоник с 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25... в последовательность 11, 13, 23, 25.... В этом случае общее нелинейные искажения выпрямителя уменьшаются примерно в 1,5 раза.

В итоге этот метод является достаточно эффективным методом уменьшения уровня нелинейных искажений, но требуется усложнение схемы выпрямителей, при этом надежность выпрямителя снижается на величину кратную усложнению его схемы, а стоимость увеличивается. Этим методом пользуются в тех случаях, когда требуется избавиться от конкретных гармоник, например 5 и 7. В практике получили наибольшее применение схемы с 12-ти и реже с 24-х пульсными выпрямителями.

Фильтрокомпенсирующие устройства [4] считаются как одни из универсальных способов снижения токов и напряжений высокочастотных гармоник в системах электроснабжения. Эти устройства имеют схему последовательного соединения емкостного и индуктивного сопротивлений, настроенных в резонанс или близко к нему на частоту генерируемой гармоники 24 тока. Пассивные

фильтры являются традиционным и наиболее распространенным методом компенсации гармонических составляющих нелинейных потребителей электрической энергии, а также применяются и для коррекции коэффициента мощности индуктивной нагрузки.

Правильно настроенный пассивный фильтр полностью потребляет ток гармоники  $n I$ , генерируемый источниками нелинейных нагрузок. Присутствие в реакторе и конденсаторе активных сопротивлений исключает возможность выполнения точной настройки фильтра на соответствующую гармонику. Таким образом, с помощью пассивного фильтра невозможно добиться полной компенсации гармоник. Для полной компенсации гармоник необходимо использовать свой фильтр для каждой гармонической составляющей.

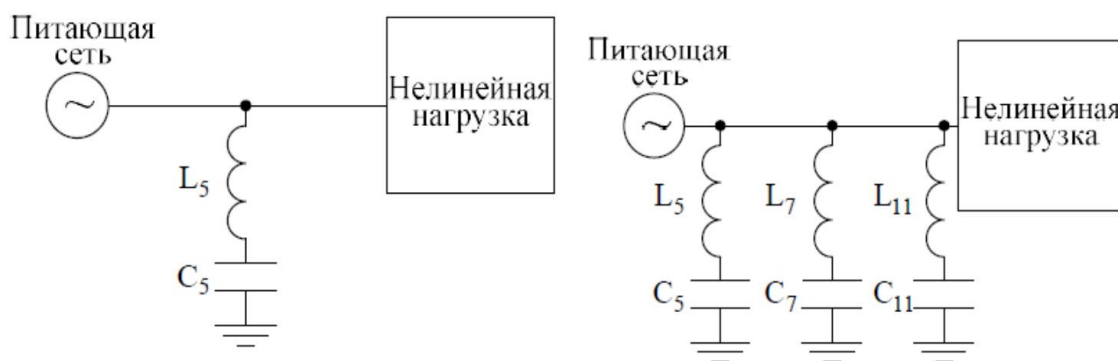


Рисунок 5 - Схемы пассивных фильтров

Наиболее перспективным техническим средством снижения уровня высших гармоник и обеспечения уровня качества электроэнергии является активный фильтр гармоник. Основные элементы активных фильтров: автономный инвертор (тока или напряжения), накопитель электрической энергии (емкость или индуктивность) и система управления.

Активные фильтры имеют большую возможность исключить все недостатки пассивных фильтров и являются наиболее перспективными и эффективными комплексными фильтрокомпенсирующими устройствами. Они помогают компенсировать практически полный спектр гармонических составляющих и реактивную мощность, потребляемую из питающей сети электроснабжения, возвращая ее обратно в сеть, лишь тогда, когда это необходимо, предотвращают резонансные явления в питающей сети, помогают сбалансировать несимметрии нагрузки и оказывают влияние на уменьшение фликера. В процессе эволюции активных фильтров гармоник были модернизированы в четыре основных вида включения в схему устройства: последовательные, параллельные, параллельно-последовательные и гибридные (пассивноактивные) фильтрокомпенсирующие устройства.

Последовательный активный фильтр – это источник регулирования напряжения и компенсации нелинейных гармонических искажения напряжения, а также провалов, колебаний, фликеров, скачков и несимметрий напряжения на входе потребителей электрической энергии.

В итоге компенсирующих действий на входе потребителя электрической энергии поступает напряжение синусоидальной формы. В результате данное фильтрокомпенсирующее устройство служит для защиты потребителей электроэнергии от некачественного напряжения в сети электроснабжения. Основное преимущество последовательного активного фильтра – это коррекция искаженной формы напряжения не имея значения от природы возникновения искажений.

Параллельно-последовательный активный фильтр – это комбинирование параллельного и последовательного активных фильтров, используемых. Такие фильтрокомпенсирующие устройства имеют превосходство, позволяющее компенсировать искажения входного напряжения потребителя электрической энергии и, одновременно, компенсировать гармонические составляющие тока того же потребителя электрической энергии.

Параллельно-последовательный активный фильтр обеспечивает комплексное повышение уровня качества электрической энергии, и при помощи последовательного активного фильтра, он защищает потребителя электрической энергии от паразитного воздействия сети

электроснабжения, а при помощи параллельного активного фильтра, он обеспечивает защиту питающей сети от негативного воздействия высокочастотных гармоник и реактивной мощности потребителя электрической энергии. В итоге параллельно-последовательный активный фильтр является унифицированным фильтрокомпенсирующим устройством повышения уровня качества электрической энергии. Существенным недостатком такого фильтрокомпенсирующего устройства - это его высокая стоимость и технически сложная конструкция.

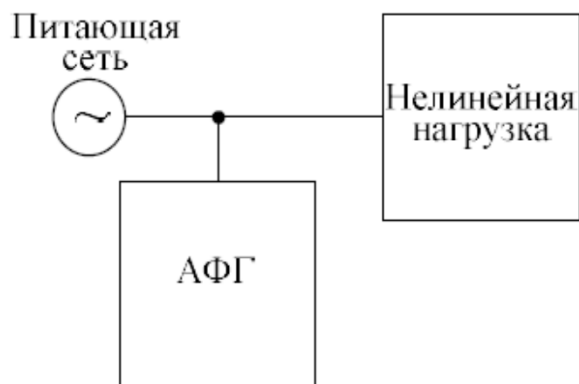


Рисунок 6 - Параллельный активный фильтр

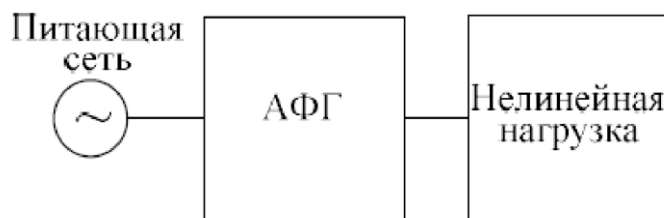


Рисунок 7 - Последовательный активный фильтр

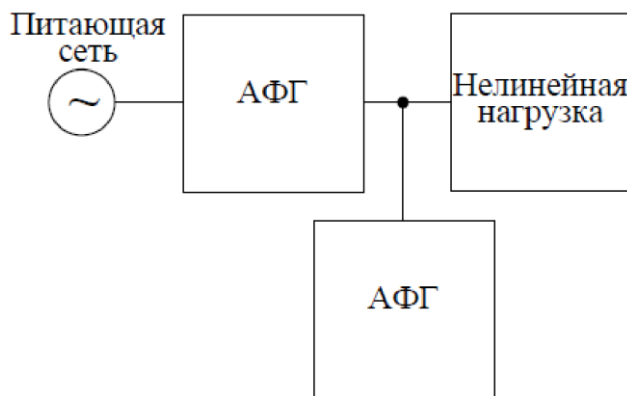


Рисунок 8 - Параллельно-последовательный активный фильтр

Гибридный пассивно-активный фильтр – это комбинирование пассивного и активного фильтра. Так как активные фильтры отличаются своей значительной установленной мощностью, превосходящую несоизмеримо с мощностью потребителя электрической энергии, то цена активных фильтров в результате самостоятельного использования довольно высока.

Гибридные фильтры применяют для возможности снижения мощности и стоимости пассивных и активных фильтров, в сравнении с практическими случаями их отдельного применения, но при этом сохраняется преимущество этих фильтров.

Следует отметить, что отсутствие стабилизации качества электроэнергии в энергосистеме может привести к негативным последствиям, предотвращение которых должно осуществляться в темпе процессов, происходящих в энергосистеме, что еще раз подтверждает необходимость регулирования высших гармоник.

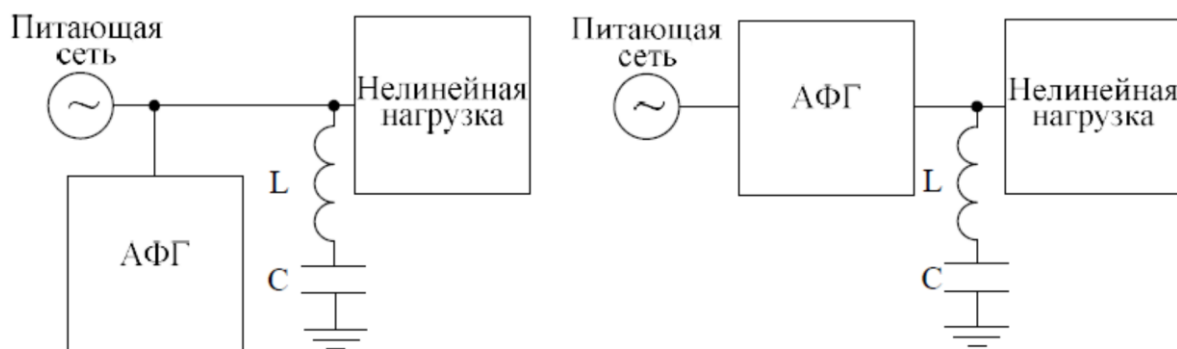


Рисунок 9 - Гибридные фильтры

В результате анализа публикаций были рассмотрены общие закономерности, определяющие влияние высших гармоник. Рекомендуется уделить особое внимание разработке и массовому внедрению в системы электроснабжения промышленных предприятия активных или гибридных фильтров в качестве альтернативы фильтрокомпенсирующим устройствам, которые при определенных обстоятельствах могут оказаться неэффективными.

#### Библиографический список:

1. Беляев, В.Л. Гармонический состав сетевого тока частотных электроприводов с широтно-импульсной модуляцией; В. Л. Беляев, С. Н. Радимов; Электромеханические и энергосберегающие системы. –2012. –№3.с. 469-471.
2. Ю. В. Семенова, Д. Ю. Политов Снижение уровня высших гармоник в электрических сетях промышленных предприятий. – 2020- с.5.
3. Кучумов, В.А. Расчет величин гармоник тока электровоза постоянного тока с прямым самоуправлением трехфазного тягового двигателя переменного тока; В.А. Кучумов, А.С. Княжева; Сборник научных трудов ОАО «ВНИИЖТ». – 2012. с. 92-100.
4. А.Е. Семенов, Разработка мероприятий по снижению влияния нелинейной нагрузки потребителей в системе электроснабжения завода «АТТР»; Под. ред. В.П. Тараканов. – 2017 – с.111.

УДК 621.311.49

### Цифровая подстанция

Замилов А. А.

*Ухтинский государственный технический университет, г Ухта, Россия.*

**Аннотация.** В 2019 г. началось выполнение одной из самых крупных программ цифровизации федерального масштаба в ПАО «Россети». Программа предполагает создание полностью цифровой сети. Идея использовать передовые технологии цифровизации для того, чтобы большей части отрасли российской электроэнергетики перейти на новую ступень развития, безусловно, привлекательна. Не случайно концепцию «Цифровая трансформация 2030», утвержденную Советом директоров ПАО «Россети» 21 декабря 2018 г., порой называют «Планом ГОЭЛРО XXI века».

Концепция «Цифровая трансформация 2030» предполагает полное преобразование энергетической электросетевой инфраструктуры до 2030 года посредством внедрения цифровых технологий. Она должна стать ключевым фактором повышения надежности и качества электроснабжения потребителей, а также будет способствовать развитию новых сервисов.

**Ключевые слова:** цифровая подстанция, МЭК 61850, интеллектуально-электронное устройство.

Переход к передаче сигналов в цифровом виде на всех уровнях управления подстанции (ПС) позволит создать технологическую инфраструктуру для внедрения информационно-аналитических систем, снизить ошибки недоучета электроэнергии, уменьшить капитальные и

эксплуатационные затраты на обслуживание ПС, повысить электромагнитную безопасность и надежность работы микропроцессорных (МП) устройств, переход к необслуживаемым ПС.

Цифровая подстанция (ЦПС) - это ПС, оснащенная комплексом цифровых устройств, обеспечивающих функционирование систем РЗА, учета электроэнергии, АСУ ТП, регистрации аварийных событий по протоколу МЭК 61850. ЦПС обладает многочисленными преимуществами по сравнению с традиционной ПС.

Преимущества ЦПС:

- 1) Повышенная надежность и доступность;
- 2) Сокращение расходов на обслуживание;
- 3) Улучшенные коммуникационные возможности;
- 4) Оптимизация работы;
- 5) Упрощение вторичных присоединений;
- 6) Повышение качества измерения;
- 7) Отсутствие электрической связи между первичным и вторичным оборудованием;
- 8) Уменьшение помещений централизованных диспетчерских управлений на ПС;
- 9) Стандартизация и совместимость [2,3].

Главное отличие стандарта МЭК 61850 от других заключается в том, что в нем регламентированы вопросы по передаче данных между устройствами, и вопросы формализации описания схем – ПС, РЗА, измерений и конфигураций устройств. Стандарт позволит использовать цифровые оптические измерительные устройства вместо традиционных аналоговых (ТТ и ТН). Информационные технологии позволяют перейти к автоматизированному проектированию ЦПС, управляемых цифровыми интегрированными системами. Вся информация на ЦПС обедняется в шину процесса. Это дает возможность значительно сократить число медных КЛ и устройств, а также позволяет более компактно их располагать.

ЦПС делится на три уровня:

- станционный уровень.
- уровень присоединения;
- полевой уровень (уровень процесса).

Полевой уровень включает в себя:

- первичные датчики для сбора дискретной информации и передачи команд управления на коммутационные аппараты;
- первичные датчики для сбора аналоговой информации.

Уровень присоединения включает в себя ИЭУ:

- устройства управления и мониторинга (контроллеры присоединения, счётчики АСКУЭ, многофункциональные измерительные приборы, системы мониторинга трансформаторного оборудования и т.д.);
- терминалы РЗ и локальной противоаварийной автоматики (ПА).

Станционный уровень включает в себя:

- серверы верхнего уровня (сервер базы данных, сервер SCADA, сервер телемеханики, сервер сбора и передачи технологической информации и т.д.);
- АРМ персонала ПС [1].

В настоящее время в России уже есть пилотные проекты ЦПС, показавшие свою эффективность.

ПС 110 кВ "Ангарская" мощностью 50 МВА стала новым центром питания Краснодара. Основная задача - повышение надежности электроснабжения северо-восточных районов. ПС обеспечит подключение новых жилых домов и краевой клинической больницы. Установлено современное энергоэффективное оборудование российского производства, позволяющее существенно снизить затраты на его обслуживание и ремонт.

ПС 35 кВ "Балатон" и 110 кВ "Ясень" совокупной мощностью 40 МВА обеспечат необходимой мощностью КС "Бабаевская" и "Дивенская" для расширения системы газоснабжения регионов и обеспечения подачи в газопровод "Северный поток - 2". Объекты оснащены передовым оборудованием, также обеспечен дистанционный контроль и управление в режиме онлайн.



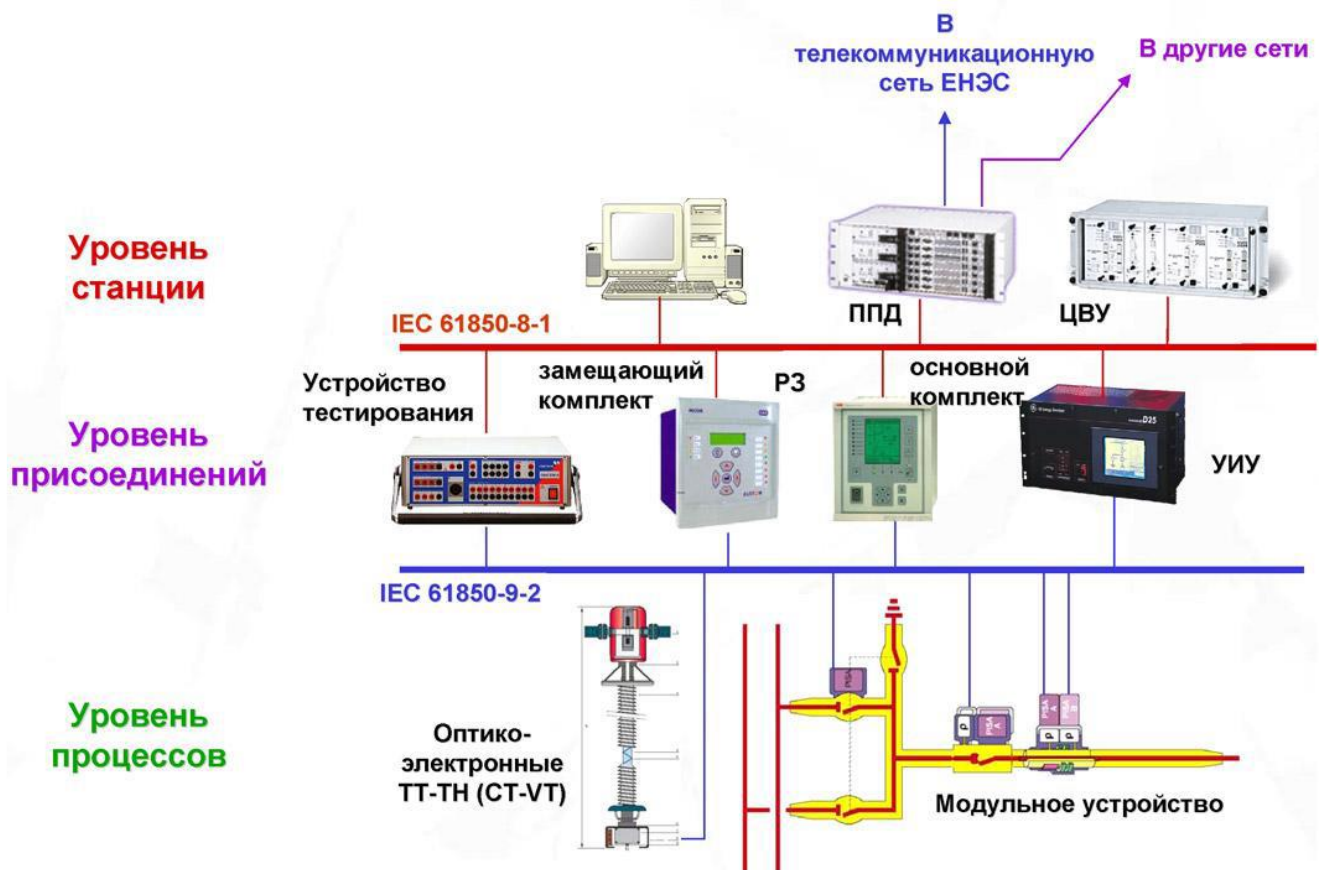


Рисунок 1 - Архитектура ЦПС

ПС 110 кВ "Ореховская" (ХМАО) мощностью 32 МВА имеет ключевое значение для электроснабжения предприятий нефтедобывающей отрасли Нижневартовского района ХМАО. Мощность ПС увеличена в два раза, что дает возможность для повышения надежности и подключения новых потребителей.

Все ПС соответствуют концепции "Цифровая трансформация 2030". Основное оборудование установлено российского производства. Были внедрены передовые технологические решения, обеспечивающие наблюдаемость и дистанционный контроль работы всего оборудования. Информационный обмен переведен в "цифру". Также установлены многофункциональные приборы измерений и учета, современная МП РЗиА [2].

ЦПС состоит из нескольких ключевых компонентов и элементов на примере оборудования российского производства:

- Цифровые трансформаторы тока и напряжения;
- Современные электронно-оптические трансформаторы тока и напряжения производства АО "Профотек" обеспечивают:
  - высокую пожаро- и взрывобезопасность;
  - оптические методы измерения параметров тока и напряжения;
  - полную гальваническую развязку, соответствие современным требованиям по электромагнитной совместимости;
  - цифровую обработку сигналов и современные интерфейсы;
  - повышение безопасности эксплуатации для обслуживающего персонала;
  - повышение эксплуатационной безопасности вторичного оборудования за счет отсутствия возникновения высоких потенциалов при размыкании вторичных цепей;
  - снижение затрат на текущую эксплуатацию, отсутствие рисков возникновения перерывов электроснабжения потребителей;
  - высокую точность измерения [3,4].
- Преобразователи аналоговых и дискретных сигналов.

Устройства БЭМП РУ производства АО «ЧЭАЗ» предназначены для установки в релейных отсеках КСО, КРУ, КРУН, а также на панелях, в шкафах управления, расположенных в релейных залах и пультах управления.

БЭМП РУ применяется в качестве основного устройства РЗА присоединений КРУ ЭС и РП сетевых и промышленных предприятий, а также предприятий нефтяного и газового комплекса.

- ИЕД-устройства РЗА БЭМП РУ

Современные интеллектуальные электронные устройства (Intelligent Electronic Device) отвечают всем требованиям стандарта МЭК 61850 и российскому корпоративному профилю ПАО «ФСК ЕЭС».

- Единое цифровое устройство

Единое цифровое устройство (ЕЦУ) объединяет в себе функции РЗА, контроллера присоединения, технического учета, отображения мнемосхемы защищаемого присоединения.

ЕЦУ с 2018 года успешно применяется в составе нового цифрового КРУ серии КРУ-ЧЭАЗ-70 с программным комплексом мониторинга и управления ПС «КВАНТ-ЧЭАЗ». К тому же российскими специалистами разработаны типовые решения применения ЕЦУ.

- Интеллектуальная цифровая ячейка КРУ-ЧЭАЗ-70

Усовершенствованные ячейки серии КРУ-ЧЭАЗ-70 соответствуют постоянно повышающимся требованиям к функциональным возможностям РУ напряжением 6-35 кВ.

Данные устройства снабжены системой мониторинга, управления и сбора данных ПК «КВАНТ-ЧЭАЗ» для внедрения на цифровом энергообъекте. Система обеспечивает обслуживающий персонал достоверной и своевременной информацией для мониторинга и анализа работы энергообъекта в дистанционном режиме. Для связи с верхним уровнем ПС организована беспроводная связь.

Передача информации внутри ячейки организована посредством сетевого оборудования и ЕЦУ, имеющего два интерфейса Ethernet для организации связи по стандарту МЭК 61850:

- 1) организацию системы дуговой защиты ячейки в соответствии с современными требованиями, а также с контролем по току и напряжению;
- 2) организацию системы видеонаблюдения при различных переключениях в отсеке выключателя и ЗН, с отображением на ПК «КВАНТ-ЧЭАЗ» в режиме реального времени;
- 3) организацию системы технического учета посредством ЕЦУ;
- 4) индикацию и отображение динамической мнемосхемы присоединения путем ее вывода на дисплее ЕЦУ.

Наличие логики оперативной блокировки разъединителей позволяет максимально защитить обслуживающий персонал не только при дистанционном управлении, но и при оперировании на рабочем месте [5].

Разработка российских технологий, связанных с ЦПС, ускорит развитие отечественной науки и производства, так же повысит энергобезопасность государства.

Все же ряд вопросов требует дополнительных проверок и решений. Это относится к надёжности цифровых систем, к вопросам конфигурирования устройств на уровне ПС и энергообъединения, к созданию общедоступных инструментальных средств проектирования, ориентированных на разных производителей МП и основного оборудования, а также к вопросам кибербезопасности.

Учитывая существующий стандарт МЭК 61850 и его применение на технологической шине, тенденция к ЦПС начинает ускоряться, следуя глобальной тенденции к оцифровке. ЦПС станут одним из ключевых стратегических элементов гибких интеллектуальных сетей, необходимых для безопасной и стабильной интеграции прерывистых возобновляемых источников энергии.

#### **Библиографический список:**

1. Корсунов П.Ю., Моржин Ю.И., Попов С.Г. Цифровая подстанция. – Москва: ФСК «ЕЭС» Научно-технический журнал «Энергия единой сети», 2013.-248с.
2. tass.ru [Электронный ресурс] / Россети ввели цифровые подстанции в четырех регионах - ТАСС. Режим доступа: <https://tass.ru/ekonomika/10343971>

3. profotech.ru [Электронный ресурс] / Электронные трансформаторы напряжения. Режим доступа: <https://www.profotech.ru/products/1112/>
4. profotech.ru [Электронный ресурс] / Трансформаторы тока электронные оптические. Режим доступа: <https://www.profotech.ru/products/206/>
5. cheaz.ru [Электронный ресурс] / Оборудование ЦПС – АО “ЧЭАЗ”. Режим доступа: <https://www.cheaz.ru/products/sgn/dgsub/dgsub-equipment.html>

УДК 621.316.176:630(470.32)

## Проектирование электроснабжения деревообрабатывающего цеха города Луза

Каргин К. А.

Научный руководитель – Полетаев С. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

Деревообработка с давних времен играет огромную роль в социально-экономическом развитии любой страны, поскольку она все свое время существования обеспечивала экономический рост государства, его внешнюю торговлю и самое главное обеспечивала рост других отраслей, прежде всего из которых выделяется строительство и удовлетворение потребителей большим спектром товаров.

С непрекращающимся развитием технологий и оборудования во всех сферах производства растет и потребность в запитывании энергией этого оборудования. Наиболее дешевым и удобным видом энергии является электроэнергия. Это означает, что сейчас существует необходимость в бесперебойности электрообеспечения всех новых потребителей и предприятий, в частности, деревообрабатывающих производств. Поэтому для постройки нового деревообрабатывающего завода в городе Луза, находящимся в Кировской области, нужно спроектировать бесперебойное электроснабжения и обеспечить питанием все оборудование цеха.

Электроснабжение необходимо спроектировать для цеха с 75 электроприемниками, размером 75х36 м с установленной мощностью оборудования, составляющей 116,48 кВт, также учесть складское помещение в 20 м от цеха и мостовой кран с электродвигателями мощностью 28,98 кВт. Источником питания будет распределительная подстанция цеха, расположенная в 30 м от цеха, напряжением 10 кВ. Важно также учесть, что цех работает в три смены, где в первую смену все оборудование цеха эксплуатируется, то есть все три линии оборудования будут в работе, во вторую смену цех загружен на 70%, что означает работу двух линий, а в третью используется 30% или только одна линия. По бесперебойности все оборудования цеха отнесено ко второй категории по обеспечению надежности электроснабжения, так как необходим хотя бы один источник резервного питания, потому что выход любого приемника из строя приведет к полной остановке всего производства.

Для деревообрабатывающего цеха понадобилось рассчитать нагрузки силовых приемников, осветительной сети, с помощью которых выбрать трансформаторы, источники света, их расположение, сечение кабеля, защитное оборудования и устройства для уменьшения потерь и компенсации. Кроме того, рассчитаны токи короткого замыкания, срабатывания токовой отсечки и срабатывания максимальной токовой защиты для подбора автоматической системы защиты. Большинство расчетов выполнено по [1].

По итогам расчетов освещения для цеха была выбрана система общего освещения с равномерным размещением светильников, ведь оборудование расположено равномерно по всей площади с одинаковыми условиями зрительной работы напряжением 220 В переменного тока, выполненную с помощью ламп ДРЛ. По дальнейшим расчетам осветительной сети по методу удельной мощности, суть которого в вычислении коэффициента для каждого помещения, учитывая тип светильника – «глубокоизлучатель» и выбранные лампы, количество осветительных приборов составило 86 единиц. Их примерное расположение над каждой из трех линий электроприемников представлено на рисунке 1.



Таблица 1 – Сопоставление величины капитальных вложений по вариантам

Статья расходов	Величина капитальных затрат, тыс. руб.		
	Проектный вариант	Базовый вариант	Сопоставление (+/-)
Затраты на приобретение нового оборудования	1762,73	2290,27	-527,54
Пусконаладочные работы (10% от п. 1)	176,27	229,03	-52,76
Монтаж нового оборудования (20% от п. 1)	352,55	458,05	-105,5
Транспортные расходы (15% от п. 1)	264,41	343,54	-79,13
Итого	2555,96	3320,89	-764,93

Из всех полученных значений можно сделать вывод, что подключение электроснабжения деревообрабатывающего цеха экономически выгодно.

После экономической части проектирования рассчитаны заземление и молниезащита. Заземление необходимо для защиты от поражения электрическим током, которое может привести к серьезным травмам и к летальному исходу. Оно должно быть не более 4 Ом при линейном напряжении 380 В, для обеспечения которого необходим искусственный контур заземления. Заземление будет производиться с внешних сторон цеха, и по итогам расчетов его сопротивление будет составлять 3,74 Ом, что удовлетворяет условиям данным в ПУЭ.

Молниезащита необходима для того, чтобы возникший в результате удара молнии электрический разряд был пропущен к земле в обход оборудования электроустановки по специальному защитному контуру. Молниеотвод состоит из трех связанных между собой частей, в которые входят молниеприемник, служащий для приема разряда молнии, токоотвод – проводник, служащий для отвода разряда к заземлителю и сам заземлитель, который в данном случае представляет собой заземление, рассчитанное ранее.

В качестве молниеотвода для молниезащиты зданий подстанций от прямых ударов молнии применяют стержневые или тросовые стальные конструкции. Для этих целей используют минимум четыре металлических мачты, высота которых должна быть на пять метров больше защищаемых объектов. Для защиты от прямых ударов молнии данной подстанции выберем защиту из четырех молниеотводов одинаковой высоты, расположенных по правильному четырехугольнику. Также проведя расчет молниезащиты и проверив его по условиям защищенности оборудования, находящегося в середине зоны защиты, сделаны выводы, что молниезащита, как и заземления, подходят для безопасности деревообрабатывающего цеха [3].

#### **Библиографический список:**

1. Кудрин, Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий [текст]: учебник для студентов высших учебных заведений / Б.И. Кудрин. – 2-е изд. – М.: Интермет Инжиниринг, 2006. – 672 с.
2. Мазурина, Е.В. Оценка экономической эффективности научно-технических решений в сфере электроснабжения и автоматики промышленных установок и технологических комплексов [текст]: Методические указания / Е.В. Мазурина. – Ухта: УГТУ, 2014. – 83 с.
3. Юриков П. А. Защита электростанций и подстанций 3-500 кВ от прямых ударов молнии [текст]: Библиотека Электромонтера / Юриков П.А. – М.: Энергоиздат, 1982. – 88 с., ил., – (Выпуск 541).

## Реконструкция станции цифрового наземного телевидения Нижний Одес

Кокин Р. О.

Научный руководитель – Старцев А. Э.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

В данной дипломной работе предлагается к рассмотрению реконструкция станции цифрового наземного телевидения (СЦНТВ) Нижний Одес.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ объекта реконструкции, выяснение основных технических характеристик станции, ее схемы, а также характеристик потребителей;
- осуществить на основании полученных данных выбор трансформатора;
- также необходимо осуществить выбор токопроводов и электрических аппаратов;
- произвести расчет токов короткого замыкания, на основании которого осуществить проверку выбранного оборудования.

Краткая характеристика проблем, существующих на станции:

На СЦНТВ Нижний Одес, схема электроснабжения данной станции представлена на рисунке 1. ЛЭП, с которой на этот трансформатор поступает напряжение заканчивается в Архангельской области. И чтобы на конце линии было номинальное напряжение, его немного завышают, в результате чего на трансформатор приходит не 6кВ, а немного больше. На самом трансформаторе есть возможность регулировки выходного напряжения. Сама регулировка уже выкручена в максимально возможное положение, понизить ещё сильнее выходное напряжение трансформатора невозможно. Поэтому на данном объекте постоянно завышенное входное напряжение.

На телецентре используют европейский стандарт 230 В +5%, как нормальное напряжение и 230В +-10%, как допустимое напряжение. В среднем на станции Нижний Одес напряжение в зависимости от времени суток меняется от 245 до 254 В. Работа не в номинальном режиме может привести к отказу оборудования.

Так же на станции установлен трансформатор ТМГ-25/6/0,4, у которого коэффициент загрузки считается не приемлемым.

Решение проблем.

Чтобы исправить проблему перенапряжения на станции, было принято решение изменить конструкцию первичной обмотки трансформатора, для это необходимо было узнать фактическое напряжение на первичной обмотке трансформатора. После этого был создан запрос у подрядчика на трансформатор с входным напряжением  $U_{вх} = 6,96$  кВт и выходным  $U_{вых} = 0,4$  кВт. Выбрав трансформатор, проверили его на коэффициент загрузки и на коэффициент максимальной допустимой перегрузки. Трансформатор прошёл проверку. После этого были выбраны и проверены питающие линии на ВН и на НН.

Выбор сечений кабельных линий напряжением 6кВ

Выбор сечений производится по экономической плотности тока и проверяется по условию нагрева наибольшим расчетным током в нормальном режиме и при работе с перегрузкой в послеаварийном режиме.

Расчёт сетей электроснабжения 0,4 кВ и выбор автоматических выключателей.

Выбор сечений кабелей для потребителей ниже 1 кВ сводится к определению длительно допустимых токов. После по допустимым токам выбираем автоматические выключатели. Для проверки линий ВН и НН, а также автоматических выключателей выполняем расчёт токов короткого замыкания (КЗ).

Расчёт коротких замыканий

Короткие замыкания возникают при нарушении изоляции электрических цепей. Причины таких нарушений различны: старение и вследствие этого пробой изоляции, набросы на провода линий электропередачи, обрывы проводов с падением на землю, механические повреждения изоляции кабельных линий. Выполнив расчёты токов короткого замыкания (КЗ), была осуществлена проверка линий ВН и НН, а также автоматических выключателей.

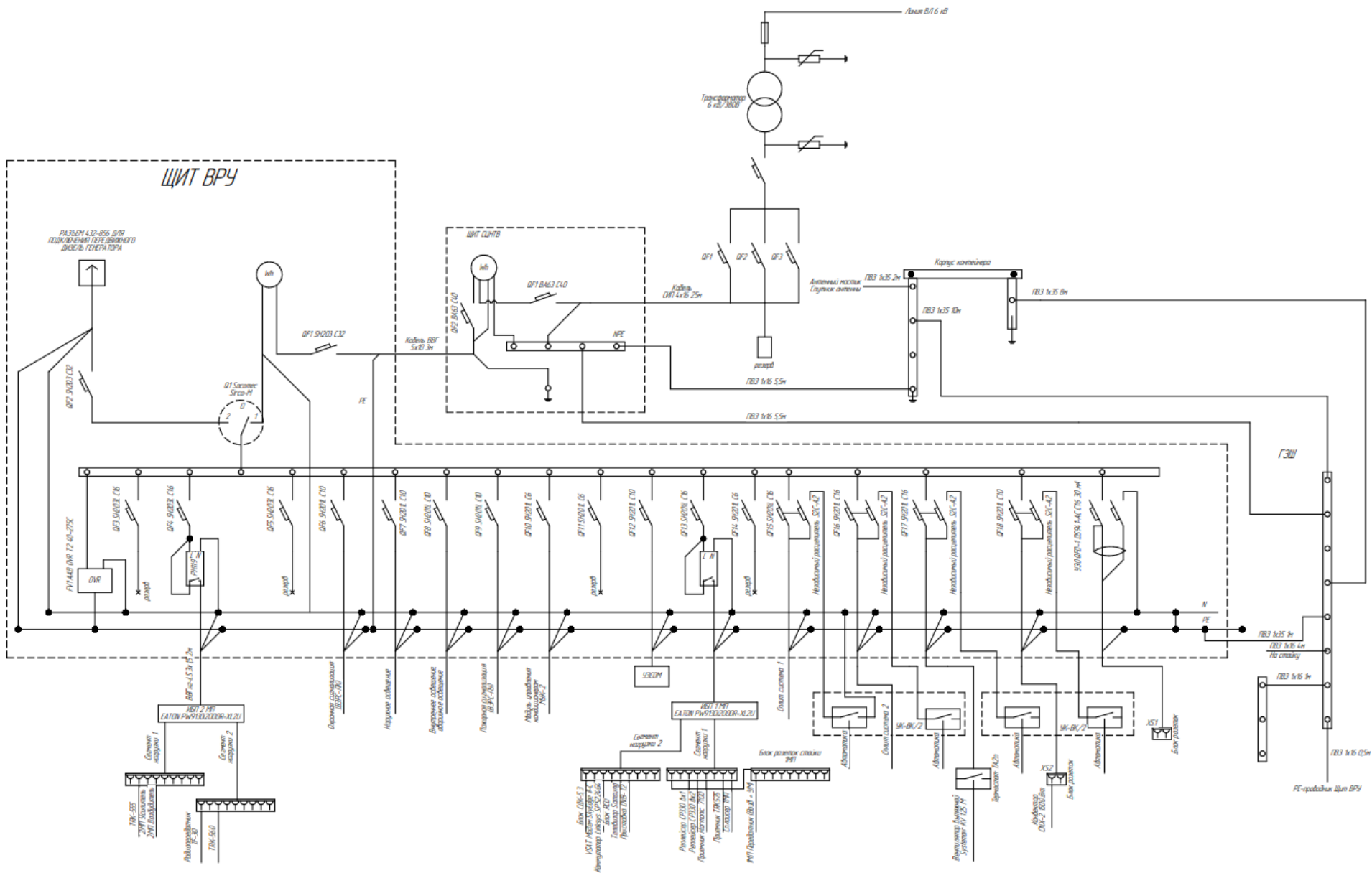


Рисунок 1 – Схема электроснабжения станции ЦНТВ

Также будут рассмотрены вопросы охраны труда при эксплуатации электроустановок. Для определения рентабельности проекта будет произведен расчет экономической эффективности.

#### **Библиографический список:**

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение / Б.И. Кудрин. – М.: Издательский центр «Академия», 2012. - 352 с.
2. Абрамова, Е.Я. Расчет понизительной подстанции в системах электроснабжения: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию/ Е.Я. Абрамова, С.К. Алешина, В.И. Чиндяскин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004.–91 с.
3. Баташов, А.И. Трансформаторы. Основные понятия. Обозначение. Примеры расчетов параметров и задания: методическое пособие/ А.И. Баташов, Н.М. Зубарев. – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2006. – 48 с.
4. Князевский, Б.А. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для студентов вузов/ Б.А. Князевский, Б.Ю. Липкин – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 400 с.: ил.

УДК 621.315:622.276

### **Реконструкция электроснабжения потребителей ПШМН**

Кочкин Н. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Разработан объем работ по реконструкции электроснабжения подводного перехода магистрального нефтепровода «Ухта-Ярославль» через р. Ухта, с расчетом электрических нагрузок, выбором оборудования, средств ЭХЗ.

**Ключевые слова:** разработка проекта; выбор оборудования; оценка экономической эффективности.

Нефтяная компания «Транснефть», полностью контролируемая государством, является монополистом на отечественном рынке углеводородов. По магистральным трубопроводам этой структуры течет 82% всего добываемого в России «черного золота». Их протяжённость составляет чуть больше пятидесяти тысяч километров. В этой огромной сети 2000 переходов под водой, которые проходят по трубам длиной 1800 км. Кроме того, в этой транспортной нефтяной империи находится 400 переходных конструкции в 2-3 ветки трубы, 1200 сооружений траншейного типа.

Тем не менее, этот не означает, что на нефтепроводных магистральных системах не бывает инцидентов, аварий и даже катастроф. Они случаются достаточно часто и как правило провоцируют серьезные экологические катаклизмы. Причинами происшествий на подобных опасных производственных объектах являются проблемы, возникающие на стадии проектирования, строительства и эксплуатации магистральных нефтепроводов, находящихся в конкретных условиях внешней среды, накладывающих зачастую на технологический процесс свои негативные особенности.

Последствия аварий, происшедших на подводных переходах магистрального нефтепровода, куда критичнее и опаснее аналогичных случаев на его линейной части. Они, как правило, сопряжены с огромным негативным влиянием на экологию региона. Это накладывает особый отпечаток на организацию технологического процесса на участке и обеспечение на нем промышленной безопасности, предъявляет высокие требования к надёжности основного и вспомогательного оборудования. Также, для обеспечения безопасности транспортировки необходимо поддерживать систему электроснабжения в исправном состоянии. Это играет ключевую роль в обнаружении и локализации возможных аварий.

Таким образом, реконструкция системы электроснабжения подводных переходов магистральных нефтепроводов является неотъемлемой частью общего процесса обеспечения безопасности транспортировки нефти и газа. Она позволяет осуществлять своевременное обнаружение и предотвращение возможных аварий, а также обеспечивает стабильную работу всей системы.



В данной статье рассматривается реконструкция подводного перехода на 45 км МН «Ухта-Ярославль».

Согласно правилам устройства электроустановок, раздел 1, глава 1.2, магистральные задвижки нефтепровода относятся к первой категории электроприемников по надежности электроснабжения и в нормальных режимах должны обеспечиваться электроэнергией от двух независимых взаимно резервирующих источников питания, и перерыв их электроснабжения при нарушении электроснабжения от одного из источников питания может быть допущен лишь на время автоматического восстановления питания.

В данной статье рассматривается повышение категории надежности электроснабжения ПП МН путем ввода независимого резервирующего источника питания.

Важным этапом проектирования и модернизации системы электроснабжения является расчет электрических нагрузок. От него зависит выбор силовых трансформаторов, расчет питающей и распределительной сети, выбор реклоузеров и т.д. Для расчета электрических нагрузок напряжением до 1000 В используем метод упорядоченных диаграмм.

Получив данные об электрических нагрузках на данном участке трубопровода, необходимо учесть не только нормальный режим работы электроустановки, но и аварийный. Рассчитываем самый тяжелый аварийный режим – короткое замыкание.

Согласно ПУЭ токи короткого замыкания рассчитываются в тех точках системы, при замыкании в которых аппараты и токоведущие части находятся в наиболее тяжелых условиях. Поэтому точки для расчета КЗ намечаем за аппаратами, которые следует выбрать и проверить на действие токов КЗ. При расчете используем данные о длине, сечении кабеля на участке КЗ, а также мощность энергосистемы. Полученные данные используем для выбора защитной и коммутационной аппаратуры, а именно вакуумного реклоузера РВА/TEL-10/630.

Для основного источника питания выбираем силовой трансформатор типа ТМГ-40/10/0,4. Данный трансформатор обеспечивает необходимый запас мощности при работе рассчитываемой энергосистемы и обеспечивает действительный коэффициент загрузки в районе 0,65-0,7.

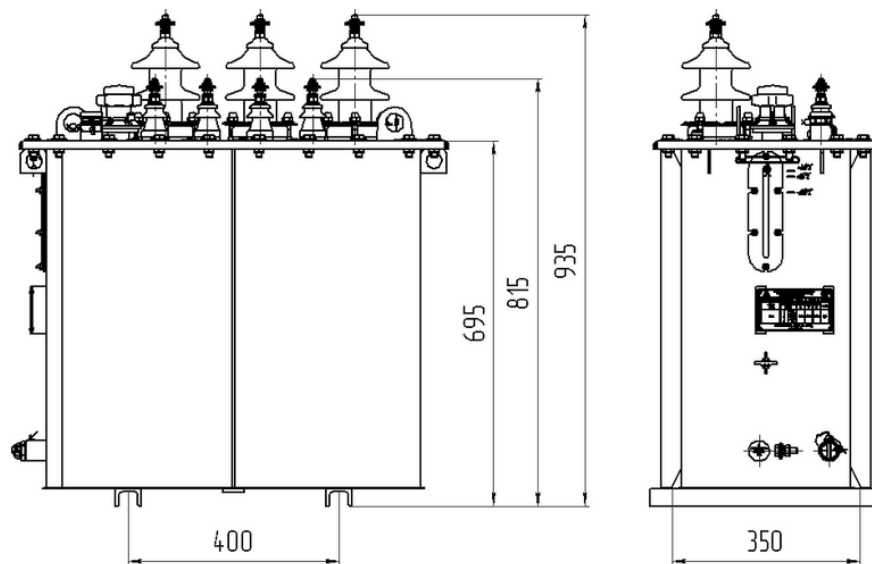


Рисунок 1 – Схематичное изображение трансформатора ТМГ-40/10/0,4

Основной целью реконструкции является резервирование электроснабжения с помощью установки дизельной электростанции (ДЭС). В состав дизельной электростанции входит:

- топливная система;
- система выхлопа;
- система шумоподавления;
- контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА);
- электрогенератор;
- дизельный двигатель.

Исходя из расчетной мощности потребителей выбираем ДЭС АД-60-Т400 с АВР. Данная дизельная электростанция подходит так же по параметрам напряжения, минимальной температуре запуска, степени автоматизации.



Рисунок 2 – Изображение ДЭС АД-60-Т400 с АВР.

Из-за схожести мощности энергопотребителей, их количества, на другом берегу р. Ухта устанавливается аналогичная ДЭС.

Далее проводим расчеты ЭХЗ и на их основании выбираем оборудование для катодной защиты: выпрямитель ПКЗ-АР-Е2-0,1.

В ходе проектирования данной реконструкции была повышена категория надежности электроснабжения подводного перехода через р. Ухта на 45 км магистрального нефтепровода «Ухта-Ярославль», а так же установлена катодная защита.

Так же будут рассмотрены вопросы охраны труда и обеспечения безопасности при эксплуатации с электроустановок.

УДК 65.011.54

### **Эффективность внедрение автоматизированного рабочего места поверителя**

Лиджиев Б. С., Отев К. С., Мучкинова Л. И.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

Быстрое и эффективное осуществление сбора, обработки и хранения огромных массивов информации стало главным условием успешного функционирования современных организаций, учреждений и предприятий. Материальную базу обращения с «активными» информационными ресурсами составляет автоматизированное рабочее место (АРМ).

Внедрение АРМ предполагает, что основные операции по накоплению, хранению и переработке информации возлагаются на вычислительную технику, а пользователь выполняет часть ручных операций и операций, требующих творческого подхода при подготовке управленческих решений. Поэтому АРМ необходимо рассматривать как усилитель интеллектуальных возможностей человека и универсальное средство обработки информации.

На этапе внедрения АРМ предприятия сталкиваются со следующими проблемами:

1. Ограниченное время эксплуатации программного обеспечения и неоправданно высокая стоимость. Поскольку в поверку поступают различные типы СИ: сегодня одни, а завтра другие – возникает сложность автоматизации метрологического обеспечения. В случае приобретения новых эталонных средств или изменения перечня поступающих в поверку СИ, актуальность разработанного программного обеспечения может быть утеряна. Помимо этого, часто меняются формы свидетельств и протоколов, что приводит к дополнительным затратам на модернизацию и приходится обращаться в компанию разработчика для выпуска нового программного обеспечения.

2. Сложность проведения валидации программного обеспечения. В метрологической лаборатории все программное обеспечение должно быть валидировано. Исходя из системы качества, лаборатория должна быть уверена в правильности применяемых методов измерений. При наличии исходников это весьма непростая задача. А если нет исходных кодов, то проверка правильности работы программного обеспечения вообще практически невозможна.

3. Сложность управления приборами и высокие риски при отладке программного обеспечения. В любом программном обеспечении возможны ошибки, всегда есть риск выбора неверных режимов эксплуатации и даже поломки дорогостоящей техники.

4. Несовместимость различных АРМ, различные форматы протоколов и интерфейсов пользователя. Наиглавнейшее качество внедрения АРМ – взаимозаменяемость сотрудников. Это неимоверно актуально, так как появляется возможность руководителю лаборатории использовать любого сотрудника за АРМ без дополнительного обучения. Но программное обеспечение различных производителей имеет различные пользовательские интерфейсы, разный функционал и различные формы отчетности. Причем каждому АРМ требуется обучение, а взаимозаменяемость сотрудников отсутствует. И, к сожалению, один из важнейших плюсов автоматизации теряется. Кроме того, хотелось бы видеть универсальный продукт, который способен автоматизировать все процессы в лаборатории – от бюро приемки до склада и выдачи заказчику протоколов.

5. Сложность внедрения и психологические барьеры. Этот этап внедрения можно считать одним из самых сложных и ответственных, так как необходимо вести диалог со специалистами с различным опытом и взглядом на процессы.

Специализированное программное обеспечение для поверки компараторов Unitess позволит избежать данные проблемы, в таблице 1 представлен потенциальный эффект от внедрения автоматизированного рабочего места.

Таблица 1 – Потенциальный эффект от внедрения Unitess

Проблема	Результат внедрения
Ограниченное время эксплуатации программного обеспечения и неоправданно высокая стоимость.	Открытые скрипты с упрощенным языком программирования, позволяющие самостоятельно менять методики, а также добавлять новые типы СИ. За счет этого стоимость разработки значительно меньше.
Сложность проведения валидации программного обеспечения	Программа соответствует всем необходимым ГОСТам в РФ.
Сложность управления приборами и высокие риски при отладке программного обеспечения	Все данные обрабатывает драйвер по строго типизированной структуре: команда – ожидание выполнения – проверка ошибок прибора\интерфейса.
Сложность внедрения и психологические барьеры	Простейшие интерфейсы пользователя Unitess АРМ и подробные инструкции по ходу проводимых измерений.

Также благодаря Unitess АРМ уменьшится количество ошибок и сократится время на поверку измерительных приборов в лаборатории, повысится достоверность результатов поверки. В таблице 2 представлены результаты, затраченные на выполнение работ.

Таблица 2 – Сравнительные характеристики

Вид работ	До автоматизации	После внедрения автоматизации
Поверка	25 минут	15 минут
Расчет значений	5-7 минут	1 минута (происходит автоматически)
Оформление протоколов	5 минут	1 минута (происходит автоматически)
Оформление свидетельств	5- 10 минут	2 минуты

Стремительно меняющиеся требования современного мира диктуют необходимость внедрения автоматизации в поверочную деятельность метрологических служб. Решить этот вопрос можно с помощью внедрения в метрологических лабораториях АРМ по поверке средств измерений.

В настоящее время на рынке представлены несколько аналогичных решений автоматизации рабочих мест. Сравнивая их, можно делать вывод, что АРМ Unitess превосходит по многим параметрам Fluke MET\CAL.

Unitess, автоматизируя процессы поверки и калибровки, способствует более эффективному выполнению измерений, упрощая регистрацию результатов и вывод необходимых записей, значительно повышает производительность и пропускную способность. На рисунке 1 схематично представлены преимущества внедрения АРМ Unitess.

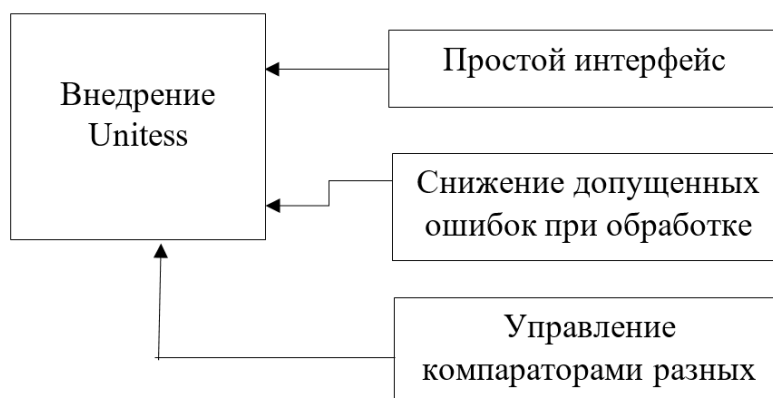


Рисунок 1 – Преимущества внедрения Unitess

Система менеджмента и автоматизации в лаборатории Unitess обладает достаточно широкими возможностями, поскольку учитывает достаточно серьезные аспекты метрологической деятельности, расширяет возможности метрологической базы данных, менеджера задач, электронного документооборота, автоматизации рабочих мест, следовательно, может стать прочной основой для любой лаборатории.

Таким образом, автоматизированное рабочее место Unitess станет существенным шагом на пути повышения качества предоставляемой услуги. Оно позволит повысить, во-первых, производительность труда сотрудника за счет исключения выполнения большого количества однотипных и рутинных операций; во-вторых, точность и достоверность метрологической информации на предприятии; в-третьих, скорость обработки данных.

### Библиографический список:

1. Автоматизация в области метрологического обеспечения // Студопедия: [сайт]. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/11\\_160727\\_avtomatizatsiya-v-oblasti-metrologicheskogo-obespecheniya.html](https://studopedia.ru/11_160727_avtomatizatsiya-v-oblasti-metrologicheskogo-obespecheniya.html)
2. Дастин, Э. Тестирование программного обеспечения. Внедрение, управление и автоматизация / Э. Дастин, Д. Рэшка, Д. Пол; Пер. с англ. М. Павлов. — М.: Лори, 2017. — 567 с.
3. Кохан, А. П. Эффективность автоматизированного рабочего места: критерии оценки и методы повышения. / А. П. Кохан // Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы: [сайт]. — Режим доступа: <http://belisa.org.by/pdf/PTS2005/213-218.pdf>

**Автоматизация обработки результатов измерений при проведении поверки компараторов на примере ФБУ «Коми ЦСМ»**

Тропин Д. И., Отев К. С.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

Большой объем метрологических работ делает актуальным вопрос повышения производительности труда. Кроме того, по мере увеличения требований к точности и быстродействию измерительного оборудования возникает необходимость в использовании компьютерных технологий и интегрированных электронных систем для автоматизации процесса измерения при поверке.

Процедура поверки компаратора подразумевает под собой непосредственное участие человека при расчете метрологических характеристик компаратора. В связи с этим возможен риск человеческой ошибки, связанной с невнимательностью, усталостью, некомпетентностью поверителя. Все это может прямо повлиять на искажение результатов поверки, сделать их недостоверными.

Автоматизация процесса поверки поможет повысить производительность, систематизировать хранение результатов поверки, упростить формирование протоколов и свидетельств. Под автоматизацией понимается применение методов, технических средств и систем управления, освобождающих человека частично или полностью от непосредственного участия в процессах получения, преобразования, передачи данных и использовании информации. Автоматизация является одной из основных направлений научно-технического прогресса.

В свою очередь, под автоматизацией поверки следует понимать совокупность конкретных операций или отдельных процедур. Общие операции, такие как внешний осмотр и опробование трудно поддаются автоматизации, а операция, отражающая реальные метрологические характеристики поверяемого средства измерения, вполне доступна для автоматизации. Автоматизация повышает достоверность результатов, снижает количество ошибок и сокращает время, необходимое для поверки приборов [1].

В области создания автоматизированных систем и средств поверки существуют следующие основные направления работ:

1. создание специализированных поверочных установок, ориентированных на узкую номенклатуру средств измерений (СИ);
2. создание специализированных систем, ориентированных на автоматизированную поверку СИ, т.е. создание автоматизированных рабочих мест (АРМ) поверителей;
3. создание автоматизированных метрологических комплексов.

В зависимости от схемно-конструктивных возможностей рабочих эталонов, поверяемых СИ и вспомогательных устройств, а также экономической целесообразностью различают три уровня автоматизации метрологических комплексов. Рассмотрим каждый из них.

На первом уровне, представленном на рисунке 1 с помощью персонального компьютера, организуется база данных нормативной документации по поверке СИ, осуществляется обработка результатов измерений и оформление результатов поверки. Данный уровень дает возможность автоматизировать некоторые рутинные, механические операции деятельности при поверке СИ, неоснащенных приборными интерфейсами и уменьшить вероятность субъективных и случайных ошибок.

В общем случае АРМ поверителя включает в себя: персональный компьютер, цифровое печатное устройство, поверяемое СИ, рабочий эталон и вспомогательное СИ.

Поверитель, выбрав нужные ему данные из числа представленных на экране дисплея, выполняет соответствующие операции, воздействуя вручную на поверяемое СИ и рабочий эталон. О выполнении каждой операции и ее результатах поверителя сообщает ПК. Результаты измерений и вычислений отображаются на экране, а протокол поверки печатается на принтере. В программном обеспечении таких АРМ поверителя могут быть введены типовые ситуации, например, несоответствие условий внешней среды, ошибки в действиях поверителя. ПК может быть поручен контроль за соблюдением условий поверки, а также через устройства связи АРМ может быть объединен с другими ПК [2].

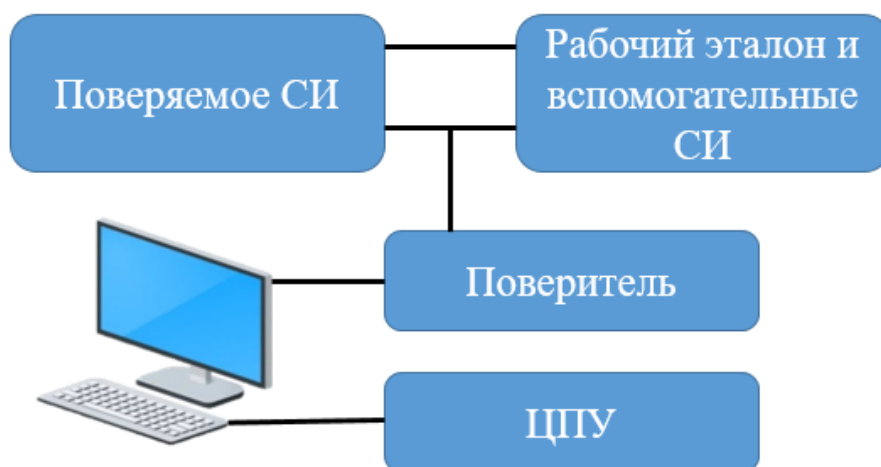


Рисунок 1 – АРМ первого уровня

На втором уровне автоматизации требуется наличие в СИ метрологического комплекса приборных интерфейсов и управляемого коммутатора. Это позволяет дополнительно автоматизировать операции коммутации СИ и управления режимами работы СИ в процессе поверки. Степень автоматизации повышается, при этом снижается утомляемость поверителя и уменьшается вероятность субъективных и случайных ошибок. Недостаток – поверки подвергаются только те СИ, которые имеют приборный интерфейс.

АРМ поверителя второго типа представлен на рисунке 2. Данный тип АРМ обладает не только возможностями АРМ поверителя первого типа, но и обеспечивает управление по заданной программе рабочим эталоном, вспомогательными и поверяемыми СИ полностью или частично без участия поверителя.

Эта возможность значительно повышает эффективность поверки, но требует разработки специализированного ПО, создание управляемого коммутатора цепей и наличия у СИ приборных интерфейсов. Такие АРМ исполняются специализированными, т.е. предназначенными для поверки определенной номенклатурной группы СИ.



Рисунок 2 – АРМ второго уровня

Структурная схема АРМ третьего типа представлена на рисунке 3.

АРМ второго и третьего уровня целесообразно внедрять на базах измерительной техники, где имеются квалифицированные специалисты и поверятся большое количество СИ [3]. В таблице 1 представлены сравнительные характеристики каждого рассмотренного уровня.

Таким образом, от наличия у поверяемого СИ электрического выхода и приборного интерфейса зависит эффективность автоматизации поверки. Следовательно, степень автоматизации поверки СИ с электрическим выходом будет выше, поскольку снижается доля участия оператора в процессе измерения, т.е. отпадает функция наблюдения за реакцией поверяемого СИ на входной сигнал, что приводит к повышению производительности труда, возможности применения программно-управляемых мер, облегчает статистическую обработку результатов измерений с помощью ПК и, в свою очередь, повышает достоверность результатов поверки. СИ без электрического выхода для наблюдения реакции на входной сигнал требует специализированных отсчетных устройств для автоматизации этой процедуры и возможности введения результатов наблюдения в ПК для дальнейшей обработки. В настоящее время разработаны различные отсчетные устройства для считывания показаний поверяемых СИ без электрического выхода на основе опико-электронных преобразователей и телеметрических систем. Однако область применения этих преобразователей ограничена из-за высокой стоимости и сложности как изготовления, так и эксплуатации.

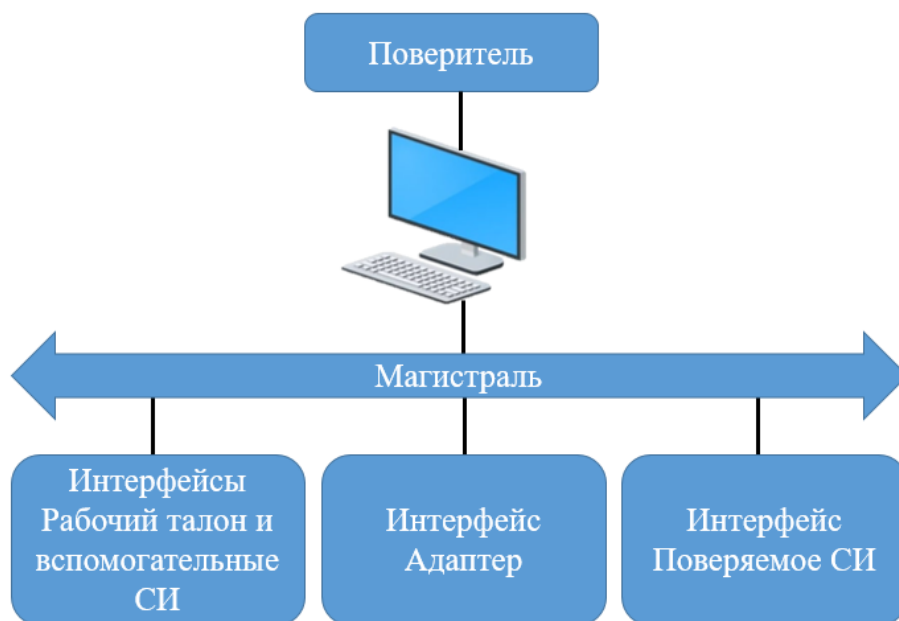


Рисунок 3 – АРМ третьего уровня

Таблица 1 – Сравнительные характеристики АРМ разных уровней

Параметр	АРМ поверителя		
	1 уровень	2 уровень	3 уровень
Автоматизируемые функции	БД по НД; обработка и оформление результатов	БД по НД; управление операциями поверки; обработка и оформление результатов	БД по НД; управление операциями поверки на уровне кодов сигналов; обработка и оформление результатов
Средства	ПК	ПК; СИ с интерфейсом; управляемый коммутатор	ПК; программируемые СИ с интерфейсом; адаптер
Поверяемые СИ	Все	Совместимы с интерфейсом	Программируемые СИ со стандартным интерфейсом
Достоинства	Применимо для всех СИ	Высокая степень автоматизации	
Недостатки	Низкая степень автоматизации	Не все СИ имеют интерфейс	Применим только для СИ с интерфейсом

## Библиографический список:

1. Автоматизация в области метрологического обеспечения // Студопедия : [сайт]. – Режим доступа: [https://studopedia.ru/11\\_160727\\_avtomatizatsiya-v-oblasti-metrologicheskogo-obespecheniya.html](https://studopedia.ru/11_160727_avtomatizatsiya-v-oblasti-metrologicheskogo-obespecheniya.html)
2. Дастин, Э. Тестирование программного обеспечения. Внедрение, управление и автоматизация / Э. Дастин, Д. Рэшка, Д. Пол; Пер. с англ. М. Павлов. — М.: Лори, 2017. — 567 с.
3. Кохан, А. П. Эффективность автоматизированного рабочего места: критерии оценки и методы повышения. / А. П. Кохан // Белорусский институт системного анализа и информационного обеспечения научно-технической сферы : [сайт]. — Режим доступа: <http://belisa.org.by/pdf/PTS2005/213-218.pdf>

УДК 621.314.263

### Вопросы электромагнитной совместимости преобразователей частоты

Петров М. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена проблема защищенности преобразователей частоты от внешних электромагнитных помех. Проанализированы общие принципы работы преобразователя частоты. В работе рассмотрены способы ограничения величины электромагнитных помех, выделяемых преобразователями в окружающую среду.

**Abstract.** This article considers the problem of protection of frequency converters from external electromagnetic interference. Analyzed the general principles of operation of the frequency converter. The paper considers the issues of limiting the magnitude of electromagnetic interference emitted by converters into the environment.

**Ключевые слова:** преобразователи, помехи, регулирование, автоматизация, электроэнергия.

**Key words:** converters, interference, regulation, automation, electricity.

Преобразователи частоты (ПЧ) представляют собой статические аппараты, содержащие устройства силовой электроники и являющиеся источниками несинусоидальных токов во входных цепях и несинусоидальных напряжений на выходе преобразователя. Входным устройством преобразователя в общем случае является выпрямитель, поэтому входной ток оказывается несинусоидальным (что вызывает несинусоидальность напряжения на шинах, от которых преобразователь частоты получает питание). Выходные параметры преобразователя формируются инвертором, который обеспечивает выходное напряжение необходимой частоты и величины за счет регулирования длительности импульсов высокой частоты (до 20 кГц). Это означает, что выходное напряжение преобразователя также несинусоидальное, и к тому же в выходных силовых цепях преобразователя протекают токи, содержащие высокочастотные составляющие, оказывающие негативное влияние на приборы и устройства других систем, расположенные в непосредственной близости от преобразователя.

Современные преобразователи частоты используют биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistors), чтобы обеспечивать эффективные и недорогие средства для создания широтно-импульсно-модулированной (ШИМ) выходной кривой, необходимой для точного управления двигателями. Эти устройства быстро переключают фиксированное напряжение шины постоянного тока, создавая кривую ШИМ с переменной частотой и переменным напряжением. Это быстрое изменение напряжения является основным источником генерируемых преобразователями частоты электромагнитных помех.

На практике вопросам электромагнитной совместимости не всегда уделяется достаточное внимание. Для оценки негативного влияния преобразователей частоты необходимо принимать во внимание, на какую аппаратуру и каким образом они могут оказывать воздействие.



При работе ПЧ могут наблюдаться следующие последствия электромагнитных помех:

- колебания оборотов двигателя;
- ошибки последовательной передачи данных;
- непредвиденные отказы процессорных устройств регулируемых преобразователей частоты;
- необъяснимые ошибки регулируемых преобразователей частоты;
- нарушение или ненормальное поведение сигнала датчиков давления, расхода, температуры;
- потеря данных в компьютерной сети;
- отказы систем цифрового управления и др.

Генерируемые преобразователями частоты электромагнитные помехи передаются как в линию переменного тока, так и излучаются на соседние проводники. Данный эффект вызывает паразитные токи, получившие название «блуждающие токи». Блуждающие токи – паразитная емкость между проводниками двигателя, заземлением оборудования и другими соседними проводниками, приводящая к возникновению наведенных высокочастотных токов.

Высокий импеданс контура заземления на высоких частотах приводит к мгновенному напряжению в точках, считающихся находящимися под «потенциалом земли». Это напряжение может появляться во всей системе в виде сигнала помехи общего вида, который может вступать в конфликт с сигналами управления. Теоретически, эти токи возвращаются в шину постоянного тока преобразователя частоты через контур заземления и высокочастотную обходную сеть в пределах самого преобразователя частоты. На практике несовершенство заземления преобразователя частоты и системы заземления оборудования, вызываемое ошибками при монтаже, влиянием окружающей среды и несовершенством материалов, может вызвать выход некоторых токов наружу в сеть питания.

Несинусоидальные токи преобразователей частоты неизбежно приводят к образованию несинусоидального напряжения в электрической цепи, питающей преобразователь. Следствием этого являются возможные нарушения в работе устройств, получающих питание от тех же шин, что и преобразователь частоты. Эти нарушения определяются степенью несинусоидальности напряжения и в той или другой степени касаются большинства электротехнических устройств. В электродвигателях действие высокочастотных составляющих напряжения приводит к снижению КПД за счет увеличения потерь в стали и обмотках двигателя. Кроме того, при большом содержании высокочастотных гармоник возможны существенные колебания вращающего момента и скольжения асинхронных машин.

В трансформаторах неизбежным следствием воздействия несинусоидального напряжения является повышение потерь в стали и обмотках, а следовательно, и повышенный нагрев трансформатора. Кроме того, возникает дополнительный шум в работе трансформатора.

Силовые кабели также подвержены дополнительному нагреву вследствие протекания емкостных токов большей величины. В кабелях, которые соединяют выход преобразователя с электродвигателем, к тому же увеличивается вероятность пробоя изоляции из-за повышения скорости нарастания напряжения в импульсах, формируемых инвертором.

Конденсаторы, применяемые в системах электроснабжения для повышения коэффициента мощности, заслуживают особого внимания. Наличие высокочастотных составляющих питающего напряжения приводит к увеличению токов конденсаторов. Также при определенных соотношениях емкости конденсаторов при наличии гармонических составляющих напряжения может наступить явление резонанса, следствием которого может быть значительное повышение напряжения, прикладываемого к конденсатору. Это может привести к электрическому пробое изоляции.

Устройства коммутации и релейной защиты при воздействии несинусоидальных токов могут изменять время включения или отключения, а моторные реле могут даже изменять направление вращения.

Проводники линии сигналов особенно уязвимы, когда они на некоторой длине проложены параллельно проводникам питания. Наводимые в этих проводниках электромагнитные помехи могут негативно повлиять как на преобразователь частоты, так и на подключенное устройство управления.

Перечисленные последствия сложно исключить, но можно уменьшить воздействие несинусоидальных токов на работу электроустановок следующими способами [4]:

- Преобразователь частоты и двигатель должны быть надежно заземлены через раму оборудования. Хорошее соединение необходимо, чтобы позволить высокочастотным токам возвращаться в преобразователь частоты, а не распространяться по сети питания.

- Следует избегать параллельной прокладки проводки двигателя, проводки линии переменного тока и проводки линии сигналов. Если невозможно избежать параллельной прокладки, следует обеспечить зазор между кабелями в 6–8 дюймов (152,4–203,2 мм) или разделить их заземленной проводящей перегородкой. Следует избегать прокладки кабелей через открытый воздух.

- Провода с одним проводником номиналом 600 Вольт обеспечивают минимальную защиту от электромагнитных помех. Рекомендуется использовать кабели с витой парой или экранированной витой парой, которые специально разработаны для минимизации отрицательного влияния электромагнитных помех. Неэкранированные кабели с витой парой часто являются подходящими, однако кабели с экранированной витой парой обеспечивают еще одну степень защиты.

- Установка экранированных кабелей питания является наиболее эффективным средством смягчения проблем электромагнитных помех. Экран кабеля заставляет шумовой ток течь обратно в преобразователь частоты до того, как он попадает обратно в сеть питания или выбирает другие нежелательные и непредсказуемые высокочастотные пути.

- Если экранированные кабели двигателя недоступны, тогда 3-фазные проводники и заземление в кабелепроводе обеспечивают некоторый уровень защиты. Такой метод не будет настолько же эффективным, как экранированный кабель, поскольку невозможно избежать контакта кабелепровода в различных точках в пределах данного оборудования.

Требования к содержанию высших гармоник во входных цепях преобразователей частоты регламентируются различными нормативными документами, в том числе рекомендациями Международной Электротехнической Комиссии [1], разрабатываемыми для национальных комитетов и комиссий, и стандартами на качество электроэнергии, действующими в каждой стране. В России требования к качеству электроэнергии изложены в ГОСТ 13109-97 [2]. Наиболее жесткими требованиями к содержанию высших гармонических отличается аналогичный стандарт США [3].

#### **Библиографический список:**

1. EN 61800-3, Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems — part 3, EMC product standard including specific test (published by CENELEC, Brussels, Belgium and National Standards organizations in EU member countries).
2. ГОСТ 13109-97. Совместимость технических средств электромагнитная. «Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».
3. The release of IEEE Std. 519-1992, «Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems».
4. Вопросы проводки и питания для электромагнитной совместимости преобразователей частоты [электронный ресурс] URL: <https://drives.ru/stati/voprosy-provodki-i-pitaniya-dlya-elektromagnitnoy-sovmestimosti-preobrazovateley-chastoty/>

**Обеспечение надёжности работы воздушных линий электропередачи в условиях гололёдных нагрузок**

Романовский С. Е.

Ухтинский государственный технический университет, г Ухта, Россия.

Актуальность: Воздушные линии электропередачи повсеместно используются для передачи и распределения электроэнергии. В России общая протяженность ЛЭП составляет около 3 млн. км. и охватывает все регионы страны. Нормальный ход производственных процессов в значительной степени зависит от бесперебойности энергоснабжения как одной из характеристик качества электроэнергии. При этом одним из факторов массовых нарушений электроснабжения потребителей выступает воздействие экстремальных погодных явлений.

В межсезонье, когда температура воздуха около нуля, могут возникать погодные условия, способствующие обледенению проводов и налипанию мокрого снега. При сильной интенсивности обледенения масса проводов в полете может за нескольких часов увеличиться в несколько раз. В результате возрастают весовые и аэродинамические нагрузки на элементы конструкции линий электропередач. Изменение профиля проводов из-за обледенения приводит к их раскачиванию под воздействием ветра, так называемой пляске. Возникает риск разрушения проводов, опор, изоляторов, что приводит к отключению энергопотребителей, дорогостоящему ремонту линии.

Прогрессирующая статистика случаев опасных гидрометеорологических явлений указывает на рост затрат электросетевых компаний на борьбу с гололедом при увеличивающейся протяженности ЛЭП. Проблема актуальна не только в России, но и за рубежом: в Канаде, Европе, Китае. Для борьбы с обледенением преимущественно практикуется тепловой способ. Это решение обладает такими недостатками, как необходимость отключения энергопотребителей, значительные затраты электроэнергии на проведение антигололедных мероприятий, риск отжига проводов, необходимость доставки оборудования на место проведения антигололедных мероприятий.

В настоящее время существует несколько исследований на тему «Обеспечение надёжности работы воздушных линий электропередачи в условиях гололёдных нагрузок». Ниже рассмотрено несколько из исследований.

Основными методами борьбы с гололедообразованием на проводах ВЛ являются: механические, электротермические, электромеханические и физико-химические методы.

Способы борьбы с гололедообразованием механическим способом.

Механический способ борьбы с гололедом заключается в использовании специальных устройств для удаления гололедных образований с проводов ВЛ посредством приложения механической силы. Одним из самых простых способов механического удаления гололедных образований является сбивание, которое производится с помощью длинных шестов с земли или вышек, установленных на специальных механизмах и транспортных средствах. К недостаткам механического способа можно отнести значительные трудозатраты, большая длительность проводимых работ, невозможность применения в труднодоступных местах.

Электротермический способ заключается в повышении температуры проводов ВЛ электрическим током. Можно выделить два основных метода: профилактический подогрев проводов ВЛ и плавка гололедных образований на проводах ВЛ.

Профилактический подогрев заключается в искусственном повышении тока проводов ВЛ, который разогревает провода ВЛ до температуры выше  $0^{\circ}\text{C}$ . При применении данного метода, как правило, используются схемы, которые не требуют отключения потребителей.

Плавка гололеда на проводах тросах ВЛ выполняется при уже образовавшемся гололеде путем искусственного повышения тока проводов ВЛ до такой величины, при которой выделяемой проводами теплоты достаточно для расплавления гололеда.

Плавка гололеда - наиболее распространенный метод борьбы с гололедом на проводах ВЛ. Удаление гололеда осуществляется посредством нагрева проводов ВЛ постоянным или переменным током (частотой 50 Гц) до температуры  $100-130^{\circ}\text{C}$ .

Электромеханический способ удаления льда заключается в следующем: по проводам линии пропускают импульс тока определенной частоты и формы, в процессе протекания этого тока по проводам возникает сила Ампера, вызывающая механические колебания проводов. Колебания предупреждают образование обледенения и разрушают корку льда. В результате, так как применяется не термическое, а механическое воздействие, прогнозируется существенное снижение времени и энергии, требуемых на очистку.

В настоящей работе приводятся электротермические способы борьбы с гололедом. Основное внимание сосредоточено на способе плавки гололеда с помощью трехфазных тиристорных мостов.

Мобильная установка для плавки гололеда на проводах и ее энергоэффективность.

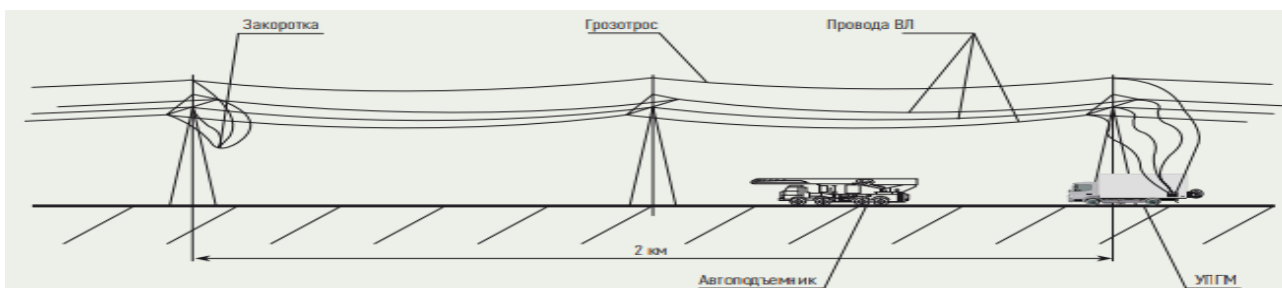


Рисунок 1 - Схема применения УПГМ при плавке гололеда

В настоящей работе описана мобильная установка для плавки гололеда на проводах ВЛ как один из наиболее перспективных методов борьбы с обледенением линий электропередач.

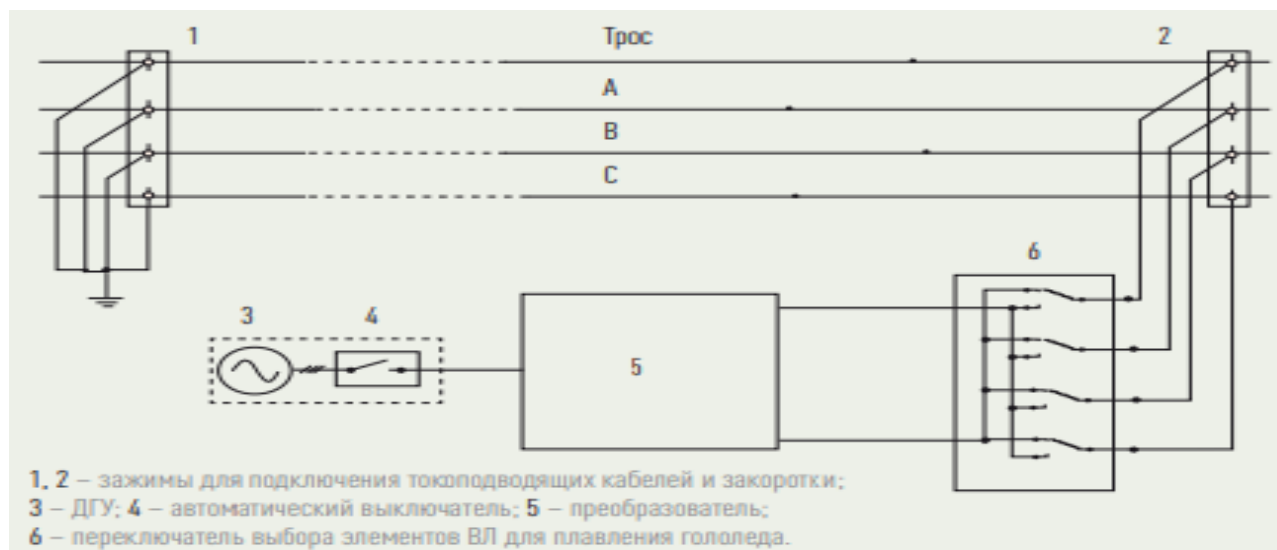


Рисунок 2 - Электрическая блок-схема и схема подключения УПГМ к ВЛ.

Электрическая блок-схема УПГМ и схема подключения ее к проводам тросу ВЛ приведены на рис. 2. Электрические параметры УПГМ определяются как режимами плавки гололеда и сопротивлениями проводов ВЛ разных типов, так и возможностями транспортировки УПГМ. В стандартном 20-футовом контейнере, расположенном на автоконтейнеровозе КАМАЗ-43118, с учетом размещения преобразователя, можно установить ДГУ мощностью не более 300 кВт, что предопределило основные электрические параметры УПГМ. При плавке гололеда на проводах выпрямленным током используются, как правило, две схемы подключения проводов к выпрямителю: фаза-фаза и фаза – две фазы. В первом варианте меньше общее время плавки, во втором – требуемая мощность. Применительно к УПГМ вторая схема предпочтительнее. Допустимые токи плавки гололеда и ее продолжительность для конкретных марок и сечений проводов даны в. Ориентировочные расчеты показали, что приемлемая ( $\leq 300$  кВт) активная мощность УПГМ обеспечивается, если плавка гололеда проводится в 30-минутном режиме на двухкилометровом участке ВЛ 110 ÷ 220 кВ (провода марок АС 120 ÷ АС 500) по схеме фаза – две фазы. В качестве источника питания выбрана

дизельная электростанция Gesan DPA 400E мощностью 288 кВт (360 кВА) с выходным линейным напряжением 400 В. Расположение дизельного генератора в контейнере представлено на рис. ниже.



Рисунок 3 - Дизель-генераторная установка, размещенная в контейнере

#### Механический способ

На небольших участках ВЛ производится, как правило, механическое удаление гололеда. Для этой цели используются шесты, веревки и другие подручные средства. При механическом удалении гололеда без отключения ВЛ должны использоваться шесты из бакелита, стеклопластика и другого изоляционного материала. Часто используется в сельской местности и на тупиковых подстанциях небольшой мощности.

Есть разработки механического удаления льда с помощью устройств, создающих пульсирующее механическое воздействие за счет протекающего по ВЛ тока.

#### Плавка гололеда

Основным методом борьбы с гололедом при эксплуатации протяженных воздушных линий является его плавка за счет нагревания проводов протекающим по ним током.

Схема плавки гололеда переменным током искусственного короткого замыкания показана на рис. 4.

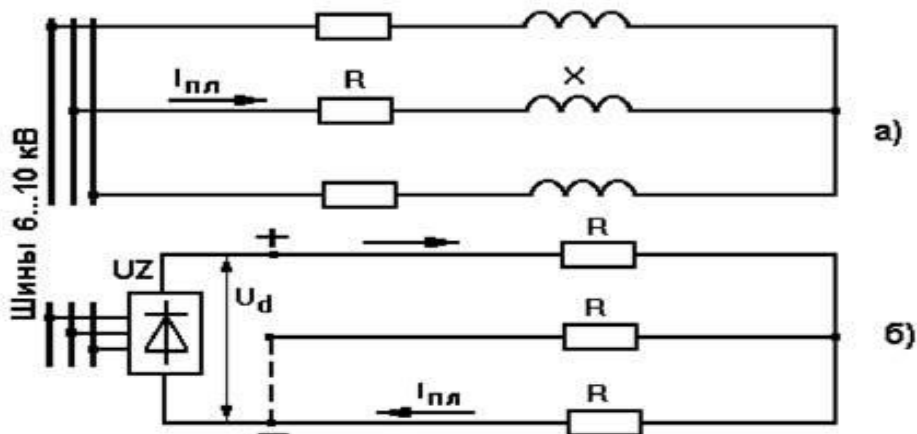


Рисунок 4 - Принципиальные схемы плавки гололеда переменным (а) и выпрямленным (б) током

### Высокочастотный метод

В 2008 году был предложен новый способ борьбы с гололедом на проводах ЛЭП.

Способ заключается в том, что без отключения линии от потребителей, на токонесущие провода подается высокочастотный ток (в пределах от 50 до 500 МГц), разогревающий провод. Так как ток имеет достаточно высокую частоту, то возникает так называемый "скин-эффект" (текущий по проводу ток вытесняется во внешний слой проводника).

Утончение слоя с ростом частоты ведет к увеличению сопротивления той части проводника, по которой течет ток (по сути, это тонкостенная трубка). Это означает, что при одинаковой величине тока, протекающего по проводу, чем выше значение частоты сигнала, тем больше рассеиваемая на проводнике тепловая мощность. Автором изобретения было рассчитано, что для предотвращения образования гололеда на проводах при использовании такого подхода требует порядка 2 Вт мощности на 1 м провода.

Однако, к недостаткам такого способа можно отнести следующее:

- необходимость постоянного прогрева проводов для предотвращения гололедообразования;
- высокая стоимость источников высокочастотного тока необходимой мощности;
- для реализации способа предлагается использовать радиопередатчики с диапазоном частот 87,5...108 МГц, что может привести к созданию радиопомех в УКВ диапазоне и невозможности УКВ связи различным экстренным службам.

Система против обледенения на основе кабеля с переменным сопротивлением

Система представляет собой незначительные модификации кабеля и сделанные из готовых компонентов электронные устройства, позволяющие путём переключения производить изменение электрического сопротивления стандартной линии электропередачи с низкого на высокое.

Высокое сопротивление автоматически вызывает нагрев, благодаря которому происходит плавление образовавшегося инея или льда, либо, прежде всего, предотвращает нарастание льда на проводах.

Главный недостаток - "незначительные модификации кабеля", что, по сути, представляет собой кабель высокого сопротивления в проводе и предполагает, фактически, развернуть новое производство. Такой провод будет, естественно, дороже. По надежности нового провода данных нет.

Применение композитных проводов повышенной прочности

В качестве пассивной меры борьбы с гололедом на проводах линий электропередач, в районах с небольшим намерзанием льда, могут использоваться различные провода повышенной прочности.

Точнее сказать это не борьба с гололедом как таковая, а повышение механической стойкости проводов и, соответственно, увеличение допустимой толщины гололеда исходя из допустимой нагрузки.

Повышение прочностных характеристик современных проводов происходит, в основном, за счет применения новых композитных материалов. Такие провода выдерживают большие нагрузки, по сравнению со стандартным АС проводом, и могут без критических последствий выдерживать образующийся на них гололед.

Однако, следует помнить, что прочность таких проводов не бесконечна, вследствие чего применение таких проводов в регионах с интенсивным гололедообразованием может быть неэффективным, а иногда даже и невозможным.

Одним из наиболее известных типов проводов повышенной прочности являются провода и кабели с несущим сердечником из композитных материалов. Как известно, стандартные стальные сердечники могут перегреться в условиях пиковых электрических нагрузок, что приводит к растяжению провода и провисанию его ниже допустимой нормы. В противоположность этому, провод с сердечником из композитов обладает более низким коэффициентом термического расширения и поэтому они менее подвержены тепловому расширению, чем проводники со стальными сердечниками. Заменяя провод со стальным

сердечником на провод с композитными материалами, можно увеличить пропускную способность линий.

Производители провода утверждают, что можно удвоить величину тока в линии без риска провисания и разрушения провода. Учитывая основные свойства композитных материалов (высокое отношение прочности к весу и малая величина провисания) можно обеспечить увеличение длины пролетов между опорами, уменьшая количество опор в линии на 15 %. Реализация данного преимущества, очевидно, возможна только при проектировании и введении в строй новых линий электропередач. Реконструкция же старых ЛЭП связана со значительными затратами.

Отметим, что стоимость таких композитных проводов пока еще существенно выше обычных.

Методы, связанные с уменьшением адгезионных свойств проводов

К пассивным методам борьбы с гололедом следует отнести и методы, связанные с уменьшением адгезионных свойств проводов. Для достижения поставленной цели рекомендовано использовать специальные разработанные смазки, однако данный принцип борьбы не получил широкого распространения из-за сложности технического обслуживания и сравнительно низкой эффективности.

Роботизированные устройства

Идея не новая. Небольшой мобильный робот, который перемещается по проводам высоковольтных ЛЭП, и выполняет ряд простых операций, в том числе и удаление льда.

Достоинством робота LineScout является возможность его управления оператором в режиме реального времени.

К недостаткам робота можно отнести:

- необходимость ручной установки робота на провод и снятия его с провода, а также перевеса с одного провода на другой. Для этого необходима специальная техника (автовышка) и обслуживающий персонал, что повышает финансовые затраты на эксплуатацию робота и затрудняет его использование в труднодоступных районах;

- необходимость управления оператором. Это означает, что на каждый экземпляр такого робота необходимо подготовить и обучить квалифицированного специалиста. Кроме затрат на обучение оператора, затраты при эксплуатации робота возрастают за счет оплаты труда оператора; - высокая стоимость самого робота. При большой протяженности линий необходимо большое количество таких роботов с обслуживающим персоналом, что может быть экономически невыгодным;

- не высокая автономность работы;

- возможные поломки самого робота неизменно влекут за собой отключения.

Однако данную разработку специалисты считают весьма перспективной

### **Библиографический список:**

1. Зорин В.В. Системы электроснабжения общего назначения / В.В. Зорин, В.В.Тесленко. Учебник для студентов ВУЗов.-Чернигов: ЧГТУ, 2005.
2. Справочник по электрическим машинам под общей редакцией Копылова И. П. и Б. К. Клокова в двух томах. Москва. Издательство Энергоатомиздат, 1988 год.
3. Способы удаления льда с проводов линий электропередач / Никитин И.Э., Абдрахманов Н.Х., Никитин С.А. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2015. №3. С. 794 - 823.
4. Герасимова В.Г. Производство, передача и распределение электрической энергии // Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. А.И. Попов). Электротехнический справочник в 4-х т. 9-е изд., стер. М.: Изд-во МЭИ, 2004, Т. 3. 964 с.
5. Корсунов П.Ю., Моржин Ю.И., Попов С.Г. мобильная установка для плавки гололёда на проводах ВЛ. – Москва: ФСК “ЕЭС” Научно-технический журнал “Энергия единой сети”, 2013.-26с.

## О модернизации электропривода дробилки

Моторина Н. П.

*Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСиС»,  
г. Старый Оскол, Россия*

**Аннотация.** Определены возможности и направления модернизации электропривода молотковой дробилки в технологическом процессе сырьевого производства. Приведена схема технологического процесса, условия эксплуатации. Выполнены расчеты и построена модель электропривода. Предложены пути по улучшению показателей.

**Ключевые слова:** дробилки ударного действия, технологический процесс, электропривод, условия регулирования параметров

**Проблема.** На территориях Европейского Севера, также как и на всех обширных северных территориях РФ находится большая часть природных залежей различных полезных ископаемых РФ. Развитие добывающей и перерабатывающей промышленности осложнено суровыми климатическими условиями, удаленностью промышленных центров. Кроме того, последние три десятилетия изменили демографическую составляющую этих территорий. Однако, добыча и переработка полезных ископаемых развивается и для этого создаются условия на промышленных предприятиях. На примере работы дробилок ударного действия рассмотрим возможность модернизации существующего оборудования для переработки разных видов сырья.

**Описание технологии.** Полезными ископаемыми Стойленского месторождения являются железные руды, неокисленные и окисленные железистые кварциты, а также попутно добываемые породы вскрыши железнорудного карьера: рыхлые (глины и суглинки, мергель, мел, песок), скальные (кристаллические сланцы, кварцито-песчаники, гранито-гнейсы), выветрелые сланцы. Железнослюдно-магнетитовые, магнетитовые и полуокисленные кварциты в среднем по типам являются породами средней крепости, а силикатно-магнетитовые – породами высокой крепости.

Главной продукцией комбината является железорудный концентрат и железная агломерационная руда для производства чугуна и стали. Добыча руды и кварцитов осуществляется в открытом карьере с помощью буровзрывных работ. Богатую железом руду сразу отгружают потребителям, а кварциты отправляют на дробилки обогатительной фабрики, чтобы при помощи магнитной сепарации произвести извлечение железорудного концентрата. В корпусе крупного дробления (ККД) принимается руда с карьера крупностью до 1200 мм, происходит ее выгрузка и дробление в конусных дробилках до крупности 350 мм (рис.1). Затем сырье транспортируется в корпус среднего и мелкого дробления [1].

Молотковые дробилки используют для среднего и мелкого дробления материалов средней прочности. Размер готового продукта регулируется изменением частоты вращения ротора, количеством и формой молотков, зазором между колосниками и расстоянием между молотками (в нижнем положении) и окружностью колосниковой решетки. Молотковые дробилки относятся к дробилкам ударного действия. Материал разрушается механическим ударом, причем кинетическая энергия движущихся тел (молотков) полностью или частично переходит в энергию их деформации и разрушения [2]. Молотковая дробилка СМ-170В – дробильная машина механического типа, применяемая для дробления кусков, зёрен и частиц минерального сырья и аналогичных материалов размером куска не более 400 мм, путем разрушения породы ударами молотков, шарнирно закрепленных на быстровращающемся роторе, а также методом разрушения кусков при ударе о плиты корпуса дробилки [1-3].

Производительность дробилки СМ-170В 210 м<sup>3</sup>/ч дробления материалов при влажности материала до 8%. К преимуществам молотковой дробилки СМ-170В можно отнести: высокую скорость дробления материала; возможность регулирования величины конечной фракции; получаемый материал имеет лучшую форму зерен; высокая эффективность и экономичность в энергопотреблении; возможность проведения быстрого ремонта [1-3].



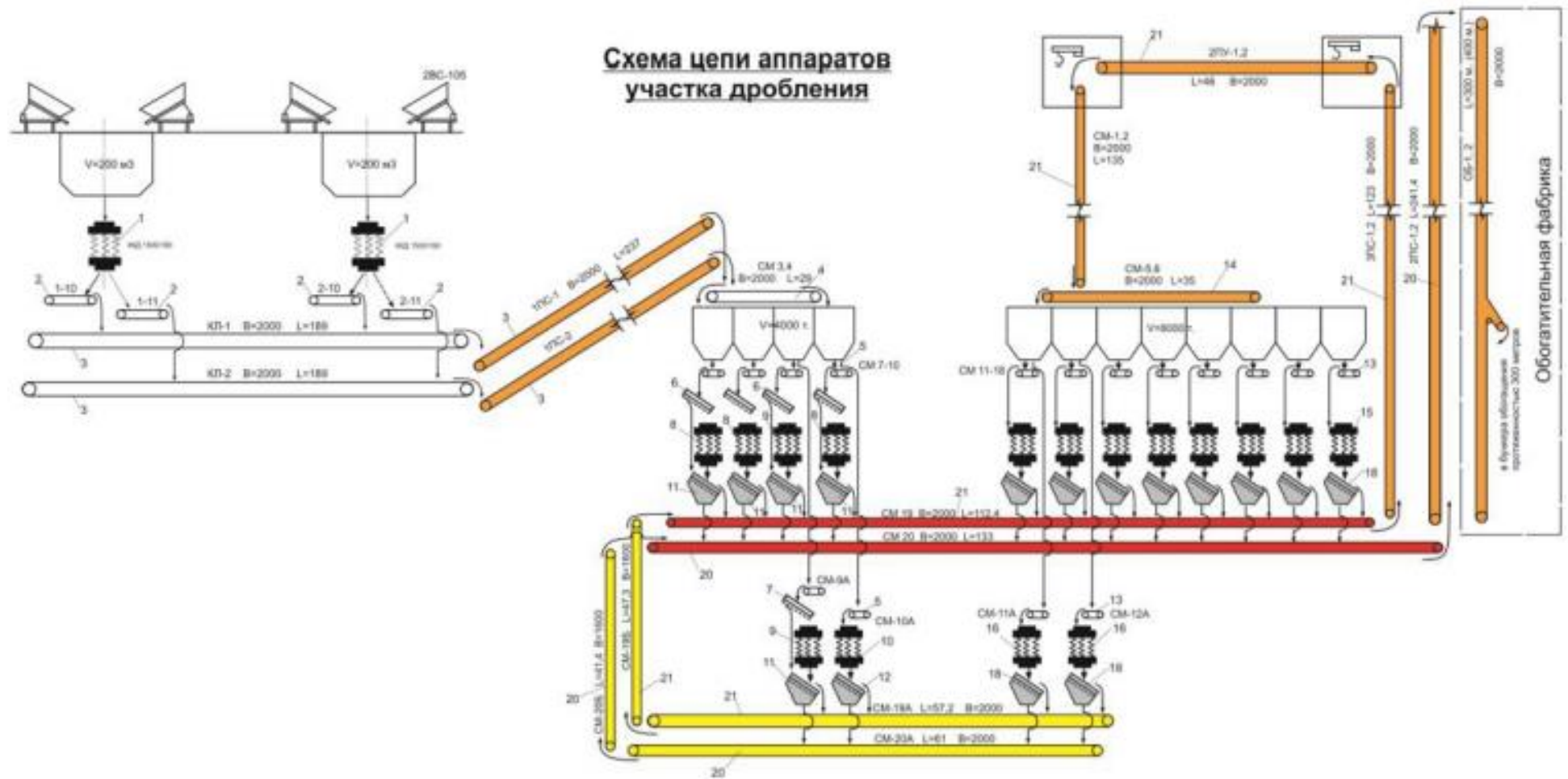


Рисунок 1 – Схема технологического процесса участка дробления

Рассмотрим принцип действия молотковой дробилки. Исходный материал загружается в дробилку сверху, под действием силы тяжести свободно скользит по лотку и падает на быстро вращающийся ротор. Под действием силы удара кусок разрушается и его части отбрасываются на футеровку и колосники, образующие камеру дробления. Ударяясь о футеровку, материал дополнительно измельчается и вновь попадает в зону действия молотков. Это повторяется многократно, до тех пор, пока куски, достигнув определенной крупности, не выйдут из щели колосниковой решетки. Кусок материала под действием эксцентричного удара начинает вращаться вокруг своего центра тяжести со скоростью, близкой к скорости рабочего органа дробилки, и разрушается от действия центробежных сил, так как при этом в куске материала возникает напряжение, превышающее предел прочности при растяжении [2]. Таким образом, в молотковых дробилках куски материала измельчаются, во первых, от удара быстро движущихся молотков, во вторых, от соударения кусков материала друг от друга, в третьих, от удара о неподвижную футеровку камеры дробления и под действием центробежных сил, в четвертых [1-3].

Электропривод молотковой дробилки характеризуется продолжительным режимом работы S1. Наиболее эффективным и энергосберегающим решением при проведении модернизации является применение системы ПЧ-АД с короткозамкнутым ротором [4].

Система управления привода должна обеспечивать регулирование частоты вращения двигателя; точную, бесперебойную, экономичную работу в условиях повышенной запылённости, загрязнённости, большого перепада температур и повышенной вибрации; жесткие механические характеристики; минимальное время переходного процесса. В существующей системе физически устарел двигатель и система управления.

Процессы взаимодействия рабочих органов с измельчаемым материалом в дробилках ударного действия сложные. Энергия при работе расходуется на удар молотка о материал, на преодоление трения молотка о слой материала, на работу ротора как вентилятора и другие потери. Математически описать эти процессы трудно из-за неопределенности вида удара (упругий или неупругий, центральный или скользящий и т.д.), непостоянства режимов работы вследствие изменяющихся условий подачи материала, крупности кусков и неоднородности физико-механических свойств дробимого материала [2].

Для расчета параметров молотковой дробилки целесообразнее пользоваться приближенными эмпирическими зависимостями [2]. На основании требований, предъявляемых к электроприводу, и расчетной мощности был выбран высоковольтный электродвигатель асинхронный закрытого типа с короткозамкнутым ротором AMD 560L12L фирмы АВВ мощностью 280 кВт и номинальной частотой вращения 495 об/мин. Электродвигатель обеспечивает высокую эффективность, надежность и готовность к работе в самых жестких условиях эксплуатации, обладает высоким КПД, обеспечивая существенную экономию за счет сокращения энергопотребления и эксплуатационных затрат. Двигатель имеет защиту от пыли и брызг воды в любом направлении. Конструкция электродвигателя обеспечивает простоту и оперативность технического обслуживания на месте установки оборудования, позволяет снизить требования к долгосрочному техническому обслуживанию [1-3].

Было проведено моделирование структуры модернизируемого электропривода и составлена модель двигателя в MATLAB/Simulink (рис.2).

Выводы: Проверка работоспособности выбранного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в системе ПЧ-АД произведена опытным путём в пакете MATLAB/Simulink. Полученные в результате моделирования графики дают возможность сказать о возможности использования синтезированной в ходе работы двигателя и системы. Полученные опытным путём результаты моделирования подтверждают работоспособность автоматизированного электропривода молотковой дробилки [4].

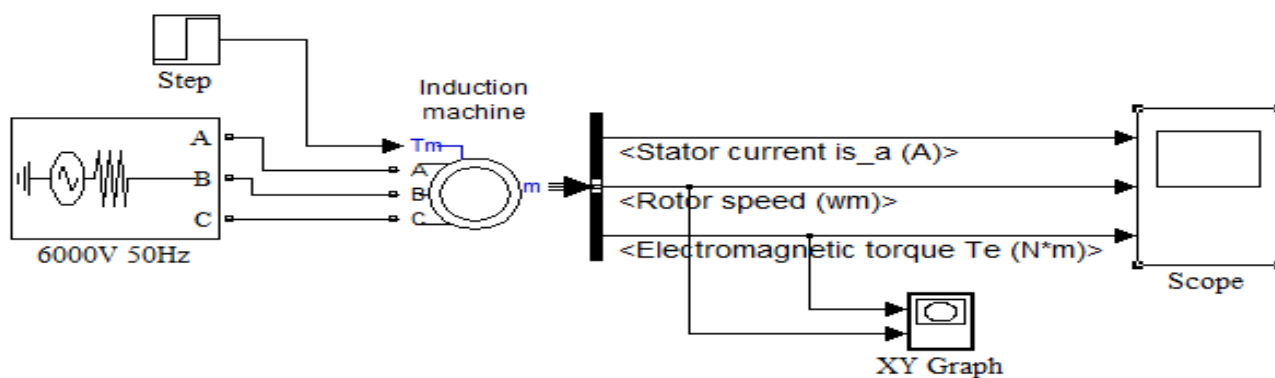


Рисунок 2 – Модель двигателя в MATLAB/Simulink

### Библиографический список:

1. Басов А.И. Механическое оборудование обогатительных фабрик и заводов тяжелых цветных металлов. – М.: Металлургия, 2008. – 112 с.
2. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых /С.Е. Андреев, В.А. Перов, В.В. Зверевич. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Недра, 1980.–415 с.
3. Донченко А.С., Донченко В.А. Справочник механика рудообогатительной фабрики. – М.: Недра, 2003. – 69 с.
4. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448с.

УДК 531.31:622.245.124

### Анализ инерционных свойств бурильной колонны представленной в виде двухмассовой структуры

Рыков П. Е.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Наиболее полно динамическое поведение колонны бурильных труб с породоразрушающим инструментом в процессе углубки скважины отражают значения крутящего момента, передаваемого на привод.

Внедрение системы управления процессом бурения, использующей в качестве управляющих воздействий динамических составляющих крутящего момента обуславливает необходимость согласования инерционных свойств канала измерения и объекта.

**Ключевые слова:** динамика бурильной колонны, инерционность бурильной колонны, постоянные времени звеньев, многомассовая структура, крутящий момент

Для выполнения требования возможности отслеживания динамических процессов объекта управления - бурильной колонны, необходимо, чтобы инерционность канала измерения была значительно ниже инерционности объекта [1].

Объект управления – колонна бурильных труб [2] может быть представлена в виде многомассовой цепочной структуры с распределёнными параметрами (рисунок 1), что позволяет проследить не только передачу воздействия крутящего момента от поверхности к забою, но и охватить эту структуру компенсационной обратной связью, которая автоматически учитывает диссипативные силы сопротивления вращению бурильной колонны [3].

Здесь  $m_1, m_2 \dots m_n$  – распределённые массы,  $M_{кр}$  – крутящий момент, приложенный к колонне бурильных труб,  $M_c$  – момент сопротивления, УС – упругая связь,  $\Delta M$  – реальный момент, действующий на бурильный инструмент,  $M_{дис} = F_d \cdot l$  – обратная связь, учитывающая момент диссипативных сил.

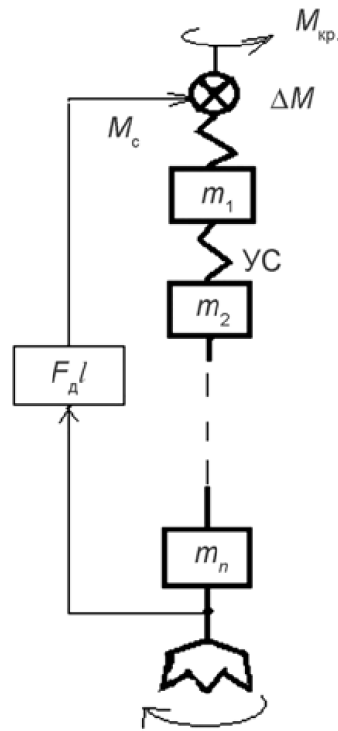


Рисунок 1 – Представление модели буровой колонны в виде многомассовой структуры

Для упрощения описания динамики структуры и математических расчётов рекомендована адаптированная двухмассовая математическая модель с допущением, что одна масса сосредоточена на устье скважины, а вторая на её забойном участке [4]. Структурная схема такой модели приведена на рисунке 2.

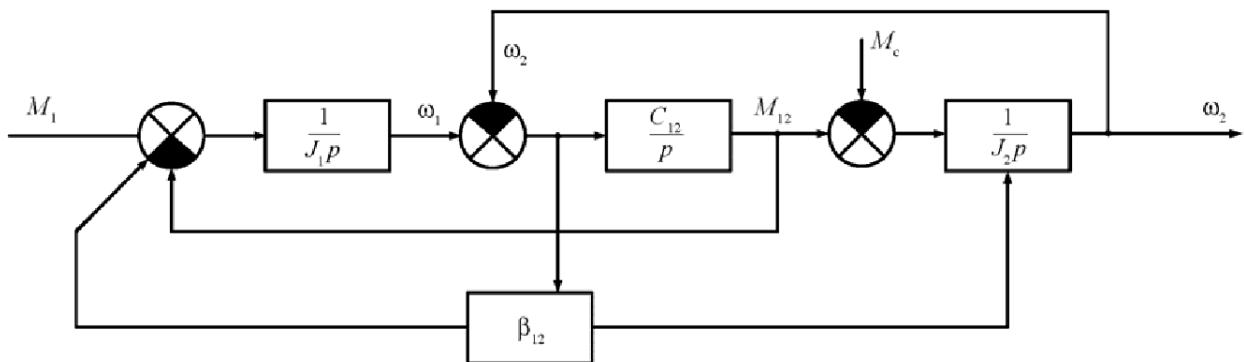


Рисунок 2 – Эквивалентная структурная схема буровой колонны на основе двухмассовой модели

Данные для конкретного примера анализа инерционных свойств буровой колонны приведены в таблице 1.

Определим расчётные значения параметров, характеризующих инерционные свойства объекта.

Момент инерции трубы:

$$J_{\text{тр}} = \frac{l_{\text{тр}} \cdot q \cdot (D^2 + d^2)}{8} = 1,5 \text{ кгм}^2.$$

Крутильная жёсткость трубы:

$$C_{\text{тр}} = \frac{\pi \cdot G \cdot (D^4 - d^4)}{32 \cdot l_{\text{тр}}} = 77445 \text{ Па},$$

где  $G = 7,7 \cdot 10^{10} \text{ Па}$  – упругий модуль сдвига материала буровой трубы.

Таблица 1 – Параметры бурильной колонны

Параметр, обозначение, размерность	Значение
Длина колонны бурильных труб $l_{\text{ктр}}$ , м	700
Диаметр трубы ТБПВ внешний $D$ , мм	127
Диаметр внутренний $d$ , мм	108,6
Частота вращения $\omega_d$ , $\text{МИН}^{-1}$	80
Частота вращения вала двигателя $\omega_{\text{дв}}$ , $\text{МИН}^{-1}$	500
Скорость бурения $V$ , м/ч	1,5
Длина трубы $l_{\text{тр}}$ , м	12
Масса единицы длины трубы $q$ , кг	36
Масса колонны труб с инструментом $m_{\text{ин}}$ , т	28
Нагрузка на долото $G$ , кН	32
Мощность двигателя привода $P$ , кВт	500

Эквивалентная жёсткость трубы:

$$C_{\text{этр}} = 0,5 \cdot C_{\text{тр}} = 38722,5 \text{ Па.}$$

Суммарный момент инерции колонны труб:

$$J_{\text{кбт}} = \frac{l_{\text{кбт}} \cdot J_{\text{тр}}}{l_{\text{тр}}} = 87,5 \text{ кгм}^2.$$

Суммарный коэффициент жёсткости:

$$C_{\text{кбт}} = \frac{C_{\text{этр}} \cdot l_{\text{тр}}}{l_{\text{кбт}}} = 663,81 \text{ Па.}$$

Приведённый к валу двигателя момент инерции колонны бурильных труб:

$$J'_{\text{кбт}} = \frac{J_{\text{кбт}}}{i^2} = 2,24 \text{ кгм}^2,$$

где  $i=6.25$  – коэффициент редуктора.

Приведённая жёсткость:

$$C'_{\text{кбт}} = \frac{C_{\text{кбт}}}{i^2} = 16,99 \text{ Па.}$$

Приведённый момент инерции растянутой части колонны бурильных труб:

$$J_1 = J'_{\text{кбт}} + 0,5 \cdot J'_{\text{кбт}} = 3,36 \text{ кгм}^2.$$

Упругость бурильной колонны:

$$C_{12} = C'_{\text{кбт}} = 16,99 \text{ Па.}$$

Момент инерции утяжелённой части бурильной колонны:

$$J_2 = 0,5 \cdot J'_{\text{кбт}} = 1,12 \text{ кгм}^2.$$

Согласно структурной модели системы, инерционность звеньев определяется их постоянными времени:  $T_1 \Rightarrow \frac{1}{J_1}$ ;  $T_2 \Rightarrow C_{12}$ ;  $T_3 \Rightarrow \frac{1}{J_2}$ ;  $T_4 \Rightarrow \beta_{12}$ , где  $\beta_{12}$  - коэффициент вязкого трения, исходя их экспериментальных данных с буровой, примем его равным  $\beta_{12} = 0,426$ .

Определённая инерционность всей структурной схемы будет равна:

$$T_{\text{бк}} = \sqrt[4]{T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_4} = 1,18 \text{ с.} \quad (10)$$

Выводы:

1. Двухмассовая математическая модель колонны буровых труб позволяет отследить динамическое поведение колонны в скважине и провести анализ её инерционных свойств.
2. Инерционные свойства буровой колонны, согласно двухмассовой модели, определяются моментами инерции её растянутой и утяжелённой частей, а также её упругостью и коэффициентом вязкого трения.
3. Сравнивая результаты анализа инерционности буровой колонны как объекта управления со значениями суммарных постоянных времени привода [5], можно сказать, что буровая колонна обладает на порядок большими инерционными свойствами. Следовательно инерционные свойства канала измерения будут определяться инерционными свойствами привода, а не объекта управления.

#### **Библиографический список:**

1. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – 3-е изд., испр. – М.: изд-во «Наука», Главная редакция физ.-мат. лит.-ры, 1975. – 768 с
2. Динамические свойства буровой колонны / И.Ю. Быков, С.Ф. Заикин, Б.А. Перминов, В.Б. Перминов // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – М.: ОАО «ВНИИОЭНГ», 2014. – № 8. – С. 4–8.
3. Быков И. Ю., Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Колонна буровых труб в процессе углубления скважины, как объект автоматического регулирования // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2012. – №10. – С. 13 – 17.
4. Заикин С. Ф., Перминов Б. А. Исследование структурной модели буровой колонны в пакете MATLAB. Сборник научных трудов (Текст): Материалы X-ой международной научно-практической конференции «Прикладные научные разработки – 2014» (25 июля - 6 августа 2014 года): / под ред. Publishing House “Education and Science” s.r.o. (Чехия, Прага), 2014. – С.27 – 32.

УДК 621.315.05(470.11)

#### **Реконструкция системы электроснабжения подстанции № 341 г. Ильинск**

Телицын Е. И.

Научный руководитель – Полетаев С. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

Требования научно-технического прогресса диктуют необходимость совершенствования промышленной электроэнергетики: создания экономичных систем электроснабжения промышленных предприятий, развития электрических сетей и использования надежного современного электрооборудования. Проектируемые и вводимые в эксплуатацию системы электроснабжения должны быть: экономичны, их схемы, конфигурации надежны, иметь рациональные напряжения, оптимальные сечения линий, а также необходимую мощность трансформаторов. Для выполнения всех этих требований необходимо не только рационально построить систему электроснабжения, но и правильно выбрать соответствующее электрическое оборудование.

При проектировании систем электроснабжения следует ориентироваться на утвержденную схему развития энергосистемы или электросетей данного промышленного района на ближайшие 5 лет с учетом перспектив на 10 лет.

В данной работе предлагается к рассмотрению реконструкция подстанции № 341 110/35/10 кВ г. Ильинск.

При анализе существующей схемы электроснабжения были выявлены следующие закономерности:

- Силовая нагрузка подстанции определяется суммарной мощностью потребителей, присоединенных к шинам секций, и расчетными потерями в оборудовании подстанции. Режим работы электроприемников, зависящий от их назначения и использования, не остается постоянным, а изменяется в различные часы суток и месяцы года. Изменяется и потребляемая

ими электрическая мощность.

- С целью выбора и проверки токоведущих элементов (шин, кабелей, проводов), силовых трансформаторов и преобразователей по пропускной способности (нагреву), а также для расчета потерь, отклонений и колебаний напряжения, выбора защиты и компенсирующих устройств, определяют электрические нагрузки. От правильной оценки ожидаемых электрических нагрузок зависит рациональность выбора схемы и всех элементов системы электроснабжения и ее технико-экономических показателей.

Силовые трансформаторы, установленные на подстанциях, предназначены для преобразования электроэнергии с одного напряжения на другое без изменения частоты. Наибольшее распространение получили трехфазные трансформаторы, так как потсери в них на 15% ниже, а расход активных элементов и стоимость на 25% меньше, чем в группе трех однофазных трансформаторов такой же суммарной мощности.

На подстанции 110/35/10 «Ильинск» установлено два силовых трехобмоточных трехфазных трансформатора ТДТН-10000/110-У1. Необходимо произвести проверку силовых трансформаторов исходя из коэффициента загрузки трансформаторов и допустимой перегрузке.

Исходя из расчетов, мощность установленных на подстанции трансформаторов не удовлетворяет существующей нагрузке, производим замену трансформаторов.

Правильный выбор числа и мощности трансформаторов на подстанциях является одним из важных вопросов электроснабжения и построения рациональных сетей. В нормальных условиях трансформаторы должны обеспечивать питание всех потребителей при их номинальной нагрузке. Выбор мощности трансформаторов производится исходя из расчетной нагрузки объекта электроснабжения, числа часов использования максимума, темпа роста нагрузок, стоимости электроэнергии, допустимой перегрузки трансформаторов.

Мощность трансформатора на подстанции определяется по формуле:

$$S_{\text{ном}} = (0,65 \dots 0,75) \cdot S_{\text{max}},$$

$$S_{\text{ном}} = 13,4 \text{ МВА.}$$

Предположительно выбираем ТДТН-16000/110-У1.

Затем выбранный трансформатор проверяется на перегрузочную способность по ГОСТ 14209-97 [17].

$$17,9 \text{ МВА} < 1,4 \cdot 16 \text{ МВА},$$

$$17,9 \text{ МВА} < 22,4 \text{ МВА.}$$

Исходя из расчетов, мощность установленных на подстанции трансформаторов удовлетворяет, оставляем трансформаторы ТДТН-16000/110-У1.

Для выбора электрооборудования, аппаратов, шин, кабелей, токоограничивающих реакторов необходимо знать токи короткого замыкания. При расчете определяют периодическую составляющую тока короткого замыкания (КЗ) для наиболее тяжелого режима работы сети. Для решения большинства практических задач расчет ведут с рядом упрощений.

Расчет токов при трехфазном коротком замыкании производят в следующем порядке:

- 1) Для рассматриваемой установки составляют расчетную схему. Расчетная схема - это однолинейная схема электроустановки с указанием тех элементов и их параметров, которые влияют на значение тока короткого замыкания и поэтому должны учитываться при выполнении расчетов.

- 2) По расчетной схеме составляют схему замещения, заменяя электромагнитные связи электрическими, источники вводят в схему замещения как ЭДС и сопротивления, остальные элементы - как сопротивления. Расчет токов короткого замыкания можно вести как в именованных, так и в относительных единицах. Предварительно принимают базисную мощность  $S_b$  (100 или 1000 МВА). За базисное принимается среднеэксплуатационное напряжение ( $U_{\text{ср.}}$ ) той ступени, на которой предполагается КЗ, согласно следующей шкале: 0,4; 3,15; 6,3; 10,5; 13,8; 15,75; 18; 20; 24; 37; 115; 154; 230; 340; 515; 770 кВ.

Расчёт коротких замыканий

Короткие замыкания возникают при нарушении изоляции электрических цепей. Причины таких нарушений различны: старение и вследствие этого пробой изоляции, набросы на провода линий электропередачи, обрывы проводов с падением на землю, механические повреждения изоляции кабельных линий при земляных работах, удары молнии в линии электропередачи и др.

Определение токов короткого замыкания необходимо для:

1. выбора электрооборудования;
2. выбора средств ограничения токов короткого замыкания;
3. проектирования релейной защиты.

Для расчета токов короткого замыкания используем метод относительных единиц.

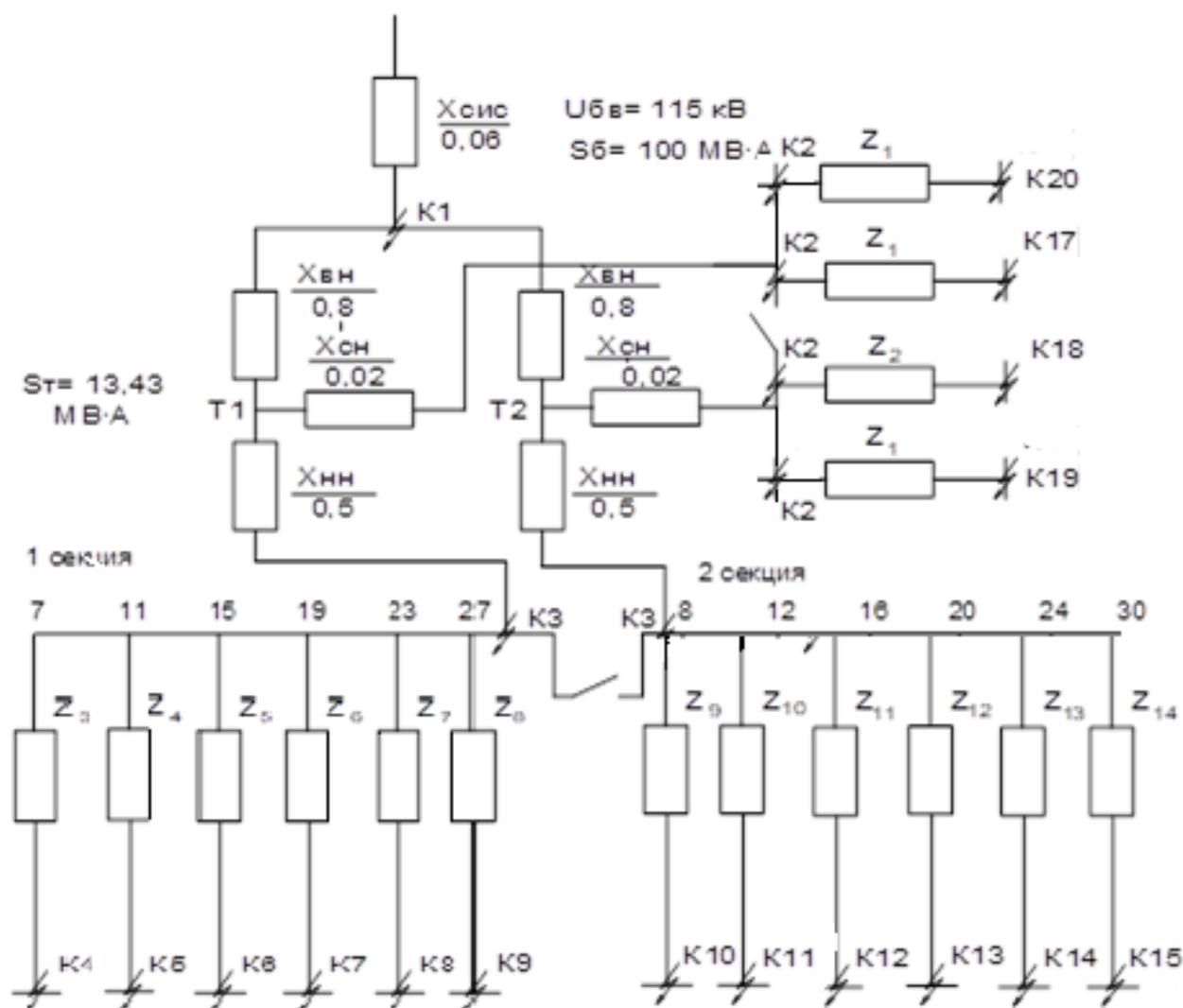


Рисунок 1 - Выбор мысленных выключателей

В связи с тем, что масляные выключатели отработали свой ресурс а запасные части для производства ремонта, как самих выключателей, так и пружинных приводов, серийно уже не выпускаются, а также учитывая то что затраты на приобретение запасных частей по специальному заказу для выполнения ремонта и технического обслуживания соизмеримы с затратами на приобретение нового выключателя и устройств РЗА, производим замену масляных выключателей на вакуумные выключатели с приводом типа «магнитная защелка» с применением типовых комплектов адаптации выключателей для монтажа в действующих РУ в количестве 19 шт.



Таблица 1.

Прибор	Тип	Мощность катушки, В·А	Число катушек	cosφ	tgφ	Потребляемая мощность	
						P, Вт	Q, В·А
Вольтметр	Э-335	2,6	1	1	0	2,6	-
Ваттметр	Д-335	1,5	2	1	0	3,0	-
Варметр	Д-335	1,5	2	1	0	3,0	-
Фазометр	Д-301	5,0	2	1	0	10,0	-
Ваттметр	Д-585	0,52	2	1	0	1,04	-
Частотомер	Э-371	3,0	1	1	0	3,0	-
Частотомер	Э-8004	3,0	1	1	0	3,0	-
Датчик активной мощности	-	1,5	2	1	0	3,0	-
Датчик реактивной мощности	-	1,5	2	1	0	3,0	-
Счетчик активной энергии	И-670	1,5	2	0,38	2,436	3,0	7,31
Счетчик реактивной энергии	И-677	1,5	2	0,38	2,436	3,0	7,31
Реле напряжения	РЭВ-84	7,5	2	0,85	0,62	15,0	9,296
Реле мощности	РБМ-271	12,5	2	0,85	0,62	35,0	21,69
Итого	-	-	-	-	-	87,64	45,606

#### Выбор нелинейных ограничителей перенапряжения

Ограничитель перенапряжения (ОПН) – это защитный аппарат, состоящий из нелинейного металлооксидного сопротивления, заключенного в изоляционную крышку. Сопротивление ОПН состоит из последовательно соединенных варисторов. Основным отличием ОПН от разрядника, определяющим особенности его выбора и эксплуатации, является постоянное подключение к сети, а не через искровой промежуток.

В нормальном рабочем режиме ток, протекающий через ограничитель носит емкостной характер и составляет несколько единиц миллиампера. При возникновении волн перенапряжений резисторы ограничителя переходят в проводящее состояние, ток возрастает на несколько порядков, достигая сотен и тысяч ампер и ограничивая при этом дальнейшее нарастание напряжения на выводах. После снижения перенапряжения ограничитель возвращается в непроводящее состояние.

#### Выбор разъединителей

Преимущество разъединителя РГП СЭЩ перед разъединителем РДЗ СЭЩ в измененной конструкции главных ножей.

Одна из колонок аппарата выполнена неподвижной, что позволило уменьшить количество кинематических связей и увеличило надёжность аппарата. Контакты хорошо работают в условиях сильного обледенения.

Выбираем разъединитель трехполюсной горизонтально-поворотного типа с полимерной изоляцией с двумя заземлителями РГП СЭЩ-з.2-1-К-110/1250 УХЛ1 комплектно с приводом ПД-14-00УХЛ1 и с одним заземлителем РГП СЭЩ-з.1-1-К-110/1250 УХЛ1 комплектно с приводом ПД-14-00УХЛ1

Будут рассмотрены вопросы охраны труда при эксплуатации электроустановок. Для определения рентабельности проекта будет произведен расчет экономической эффективности

#### **Библиографический список:**

1. Абрамова, Е.Я. Расчет понизительной подстанции в системах электроснабжения: учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию/ Е.Я. Абрамова, С.К. Алешина, В.И. Чиндякин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004.–91 с.
2. Баташов, А.И. Трансформаторы. Основные понятия. Обозначение. Примеры расчетов параметров и задания: методическое пособие/ А.И. Баташов, Н.М. Зубарев. – Улан-Удэ: ВСГТУ, 2006. – 48 с.
3. Дорошев К.И. Выключатели и измерительные трансформаторы в КРУ 6-220кВ/ К. И. Дорошев. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 148 с.
4. Князевский, Б.А. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. для студентов вузов/ Б.А. Князевский, Б.Ю. Липкин – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 400 с.: ил.
5. Копьев, В.Н. Релейная защита основного электрооборудования электростанций и подстанций: учебное пособие/ В.Н. Копьев– 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: ЭЛТИ ТПУ, 2005. – 170 с.

УДК 621.313.3:005.591.6

#### **Разработка схемы автоматизации пуска электродвигателя вентилятора местного проветривания**

Щетинин Е. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье рассматривается вопрос создания отечественной системы автоматизации вентиляции. Проведен анализ и расчет всех элементов схемы автоматизации на примере вентилятора местного проветривания. Схема реализуется на отечественных компонентах. Представлена методика расчета и способы её реализации.

**Ключевые слова:** электрический привод, автоматизированный привод, система автоматизации.

На сегодняшний день эффективными мерами по борьбе с загазованностью помещений и горных выработок являются мощные вентиляторные установки, позволяющие поддерживать допустимый уровень концентрации газов в помещении [1]. Такими помещениями могут быть аккумуляторные блок-боксы или горная выработка, а также газотурбинные установки. Зарубежные системы управления вентиляторами имеют большой процент на российском рынке. Ввиду необходимости импорт замещения в последние годы, создание отечественных систем автоматизации производственных процессов является одним из актуальных вопросов.

Для дополнительного проветривания тупиковых выработок во время проходки в шахтах, в целях предотвратить повышение концентрации метана применяют взрывозащищенный шахтный вентилятор местного проветривания серии ВМЭ [2]. Что бы исключить постоянную работу ВМЭ во время допустимой концентрации метана до 2 %, возможно создание простой системы управления электрическим двигателем вентилятора [3].

Разработанная система автоматизации вентилятора местного проветривания, позволяет пускать двигатель вентилятора в зависимости от допустимого уровня концентрации метана  $CH_4(\%) \geq 1,5\%$ . Для этой цели возможно применения стандартного взрывозащищенного датчика метана Марш-Д с выходным сигналом тока в промежутке от 4 мА, что соответствует 0 %  $CH_4$  и до 20 мА, что соответствует 4 %  $CH_4$ . Для пуска двигателя серии SE160 применяется реле напряжения на 1140 В от пускателя ПВИ-320.

На рисунке 1 представлена структурная схема автоматизации, где Д – датчик метана, УУ – управляющее устройство, ОУ – объект управления.

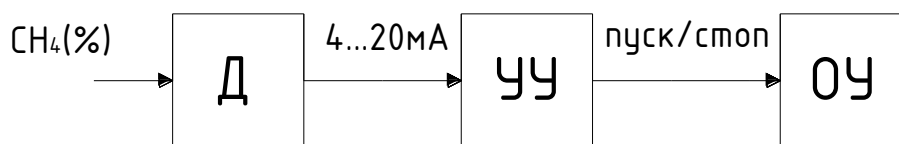


Рисунок 1 – Структурная схема автоматизации SE160

На рисунке 2 представлена разработанная схема устройства управления вентилятором. Принцип работы схемы заключается в следующем. Во время повышения концентрации метана  $\leq 1,5\%$ , датчик будет выдавать  $0,01\text{ А}$  по токовой петле, через гальваническую развязку оптопарой, произойдет падение напряжения на входе усилителя DA1, с коэффициентом усиления 160, который усилит сигнал до  $24\text{ В}$  и выше, и DA2, с коэффициентом усиления 1. К выходам усилителя DA1 подключен оптосимистор, гальванически развязывающий цепь, с током срабатывания равный  $15\text{ мА}$ , который коммутирует цепь при усилении напряжения до  $24\text{ В}$ . Катушка реле КМ сработает и замкнутся контакты реле КМ1, двигатель запустится (рисунок 2).

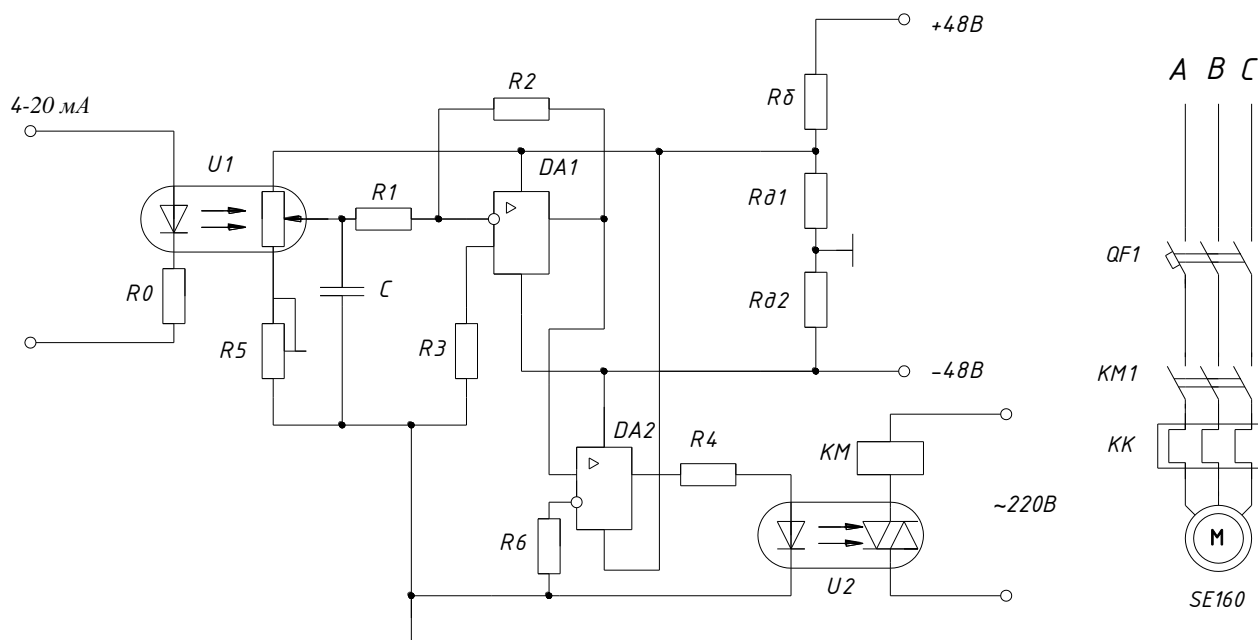


Рисунок 2 – Схема автоматизированного пуска вентилятора ВМЭ от уровня концентрации метана

Необходимый выходной ток с датчика, при концентрации  $\text{CH}_4$  равной  $1,5\%$  выбирается из условия:

$$I_{\text{вых}}(\text{CH}_4(\%)) = \frac{20\text{мА}}{3\%} \cdot 1,5\% = 10\text{ мА}.$$

В качестве гальванической развязки на выходе из датчика применяется устройство состоящее из оптрона VTL5C2, рассчитанным сопротивлением на выходе  $R_{OP} = 800\text{ Ом}$  при  $I_{\text{ex}} = 10\text{ мА}$ ,  $R_{OP} = 5,5\text{ кОм}$  при  $I_{\text{ex}} = 1\text{ мА}$  и  $R_{OP} = 600\text{ Ом}$  при  $I_{\text{ex}} = 20\text{ мА}$ . Установлено подстроечное сопротивление  $R_5$  до  $470\text{ Ом}$ , для регулирования чувствительности датчика.

Для схемы усиления выбираются 2 операционных усилителя К140УД1Б (рисунок 3): с коэффициентом усиления  $K_u = 1 \dots 12000$ , напряжением питания  $U_{\text{num}} = \pm 12\text{ В}$  и сопротивлением входа  $R_{\text{ex}} \leq 5\text{ кОм}$ .

Коэффициент усиления схемы (рисунок 1) будет равен:

$$K_U = \frac{R_2}{R_1};$$

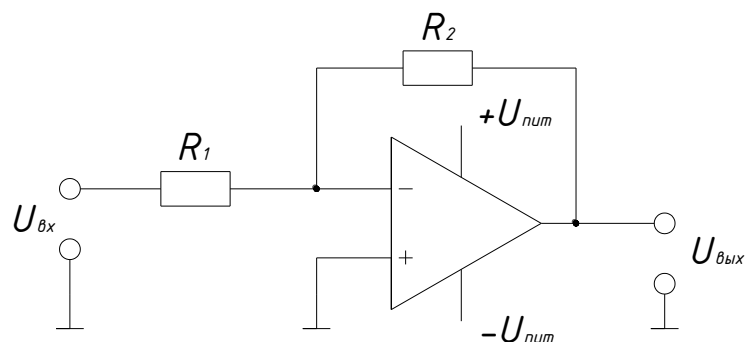


Рисунок 3 – Схема операционного инвертирующего усилителя DA<sub>1</sub>

Ток выхода из оптрона рассчитывается:

$$I_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{пит}}^+}{R_{\text{OP}} + \frac{R_5 \cdot (R_1 + R_3)}{R_5 + (R_1 + R_3)}}.$$

При установленном сопротивлении  $R_1 = 10$  Ом напряжение на вход усилителя выбирается равным:

$$U_{\text{вх}} = I_{\text{вых}} \cdot R_1.$$

Необходимый коэффициент усиления  $K_U$  для операционного усилителя рассчитывается из условия напряжения на выходе усилителя равному 24 В:

$$K_U = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}.$$

Сопротивление  $R_2$ , для  $K_U$  равному 160, выбираем:

$$R_2 = K_U \cdot R_1$$

Напряжение выхода:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} \cdot K_U.$$

Коэффициент усиления DA<sub>2</sub> примем равным единице. Резистор  $R_3$  принимается равным 10 Ом.

Для гальванической развязки и коммутации реле КМ на выходе усилителя был выбран оптосимистор КМОС3081 с током включения  $I_{\text{вкл}} = 15$  мА, с  $U_{\text{обр}} = 800$  В, и напряжением изоляции 5000 В. На выход оптосимистора подключим катушку контакторного реле КМ с напряжением 1140 В. Для срабатывания оптосимистора производится расчет  $R_4$ :

$$R_4 = \frac{U_{\text{вых}}}{I_{\text{вх}}^{\text{OC}}}.$$

Для питания усилителя необходим источник питания напряжением 48 В.

Для расчета делителя напряжения с входным напряжением  $U_{\pm 48} = 48$  В и выходным напряжением питания усилителя  $U_{\text{пит}} = 12$  В принимается суммарное сопротивление в 2 кОм.

Тогда, ток на  $R_1$ :

$$I_1 = \frac{U_{\pm 48}}{R_{\text{общ}}}.$$

По закону Ома ток  $I_1 = I_2$ , теперь найдем  $R_{д2}$  и  $R_{д3}$ :

$$R_{д1} + R_{д2} = \frac{U_{num}}{I_2}.$$

Возьмем из стандартного ряда E48 два резистора  $R_{д1}$  и  $R_{д2}$  с номиналом по 249 Ом. Корректирующий конденсатор  $C$  выбирается равным 20 пФ. Сопротивление  $R_6$  принимается равным 10 Ом.

Таблица 1 – Спецификация схемы автоматизации вентилятора SE160

Обозначение	Название	Установленные параметры
$R_0$	Резистор, ряд E24	1 кОм
$R_1$		10 Ом
$R_2$		2,4 кОм
$R_3$		10 Ом
$R_4$		1,6 кОм
$R_6$		10 Ом
$R_6$		1,5 кОм
$R_{д1}$	Резистор, ряд E49	249 Ом
$R_{д2}$		249 Ом
$R_5$	Подстрочный резистор	0,5 кОм
$U_1$	Оптрон VTL5C2	0...0,20 мА, 5,2...0,6 кОм
$U_2$	Оптосимистор КМОС3081	$I_{вкл} = 15$ мА, $U_{из} = 5000$ В
$C$	Конденсатор	30 пФ
$DA_1$	Усилитель 140УД1Б	$K_u = 160$ , $U_{num} = 12$ В
$DA_2$	Усилитель 140УД1Б	$K_u = 1$ , $U_{num} = 12$ В
КМ	Катушка магнитного пускателя	$U = 220$ В, $U_{конт.} = 1200$ В

Спроектированная схема является оптимальным решением проблемы автоматизации описанных систем вентиляции воздуха. При разработке схемы использовались отечественные компоненты.

#### Библиографический список:

1. Ананьев В. А. Системы вентиляции и кондиционирования. Теория и практика / Л. Н. Балуева, А. Д. Гальперин, А. К. Городов, М. Ю. Еремин, С. М. Звягинцева, В. П. Мурашко, И. В. Седых – М.: «Евроклимат», 2003. – 460 с.
2. Пузырев В. Н. Вентиляция шахт: учеб. Пособие / сост.: В. Н. Пузырев, Л. А. Шевченко. – Электрон. дан. – Кемерово: КузГТУ, 2012. – 160 с.
3. Ерофеева, Е. В. Проектирование систем автоматизации: учеб. пособие / Е. В. Ерофеева, Б. А. Головушкин; Иван. гос. хим.-технол. ун-т. - Иваново, 2012. – 96 с.

## СЕКЦИЯ 2. МЕХАНИКА И ФИЗИКА ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

УДК 519.21:51-72

### Теоретические основы вероятностного моделирования в прикладных задачах механики

Габова М. Н., Мужикова А. В., Савич В. Л.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** При расчетах прочностных характеристик технических конструкций возникает необходимость определения параметров распределения напряжений в зависимости от влияния рассеивания размеров конструкций и нагрузок. Использование вероятностного подхода в исследовательских задачах механики позволяет учитывать вероятностный характер конструктивных параметров: определять законы распределения рассматриваемых случайных величин, находить вероятности предельно допустимых значений факторов, и др. – что составляет задачу вероятностного моделирования.

**Annotation.** When calculating the strength characteristics of technical structures, it becomes necessary to determine the stress distribution parameters depending on the effect of dispersion of the dimensions of structures and loads. The use of the probabilistic approach in research problems of mechanics makes it possible to take into account the probabilistic nature of the design parameters: to determine the distribution laws of the random variables under consideration, to find the probabilities of the maximum permissible values of factors, etc. - which is the task of probability modeling.

**Ключевые слова:** случайные величины, математическая статистика, вероятностное моделирование в задачах механики.

**Keywords:** random variables, mathematical statistics, probabilistic modeling in problems of mechanics.

При решении исследовательских задач механики применяются и вероятностные методы, которые позволяют рассматривать некоторые параметры задачи за случайные величины с их законами распределения. Приведем в представленной работе основные понятия, теорию и методы вероятностного моделирования.

Теория вероятностей – раздел математики, в котором изучаются закономерности массовых (повторяющихся) однородных (при осуществлении одних и тех же условий) случайных событий. Случайное событие может заключаться в том, что какой-то исследуемый параметр будет иметь определенную величину, числовое значение. Причем наперед неизвестно, какое значение примет эта величина, т. е. она является случайной величиной. Множество возможных значений параметра образуют множество значений случайной величины. Например, нормальное напряжение  $\sigma$ , возникающее в сечении консольной балки сплошного кругового сечения длины  $l$  и диаметра  $d$  с силой  $P$ , приложенной к ее концу, является случайной величиной  $\sigma = \sigma(P, l, d)$ , поскольку конструктивные параметры обладают рассеянием значений.

Наблюдая и анализируя значения случайной величины, можно обнаружить, что значениям присущи свои закономерности. Какие-то значения наблюдаются чаще, какие-то реже, т. е. одни более вероятны, другие менее вероятны. Проявление закономерности трудно заметить, если количество опытов мало. С увеличением числа опытов частота повторения некоторого события будет приближаться к определенному числу, поэтому вероятность определяют как предел отношения числа опытов, в которых событие произошло к общему количеству проведенных опытов. Это и есть опытное (статистическое) определение вероятности, которым пользуются в практических задачах:

$$P_i = P(X = x_i) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n_i}{N}.$$

О вероятности можно судить, и не проводя опытов (априори), вычислив ее в некоторых случаях, например, по классической формуле вероятности, геометрической вероятности, аксиоматическому определению.

Таким образом, случайная величина определяется как величина, которая принимает определенные значения с определенными вероятностями. Случайные величины могут быть дискретными или непрерывными. Дискретные принимают отдельные значения, которые можно перечислять. Непрерывные принимают все возможные значения из некоторого промежутка. К непрерывным величинам относится большинство случайных величин. Непрерывные величины обладают характерной особенностью: вероятность того, что случайная величина примет какое-то одно определенное значение, равна нулю ( $P(X = a) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{N} = 0$ ). Поэтому, говоря о вероятности в таком случае, рассматривают бесконечно малый интервал, содержащий это значение:

$$P(X \in (x; x + \Delta x)) := \Delta P(x).$$

Если  $\Delta x \rightarrow 0$ , то  $\Delta x = dx$ . Так как вероятность зависит от значения  $x$ , т. е. является некоторой функцией  $f(x)$ , пропорциональна длине интервала  $dx$ , то:

$$P(X \in (x; x + \Delta x)) = P(X \in (x; x + dx)) = f(x)dx = dP(x).$$

Совокупность всех значений вероятностей данной величины образует распределение данной случайной величины, которое определяется функцией  $f(x)$  – плотностью распределения вероятностей, которая имеет смысл вероятности, отнесенной к единице длины интервала:

$$f(x) = \frac{dP(x)}{dx}.$$

Тогда вероятность того, что случайная величина примет какое-то значение в некотором интервале, примет следующий вид:

$$P(X \in (a; b)) = \sum_i \Delta P(x_i) = \int_a^b dP(x) = \int_a^b f(x)dx.$$

Последнее равенство определяет геометрический вероятностный смысл функции плотности: вероятность равна площади криволинейной фигуры под функцией плотности в пределах от  $a$  до  $b$  (рис. 1).

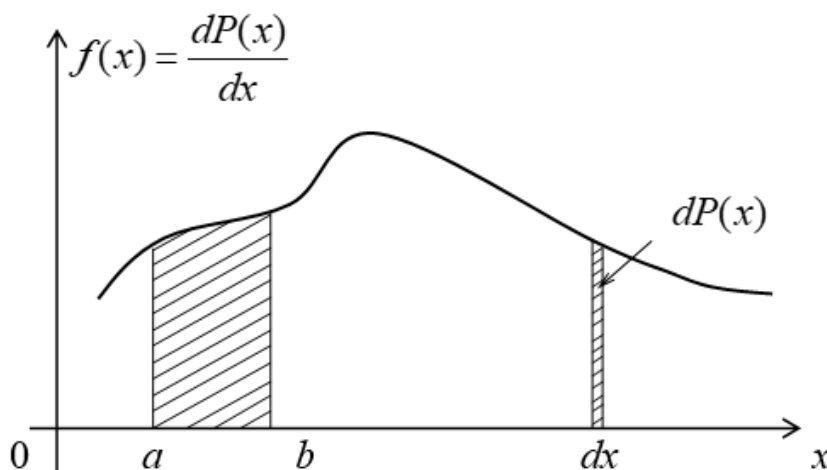
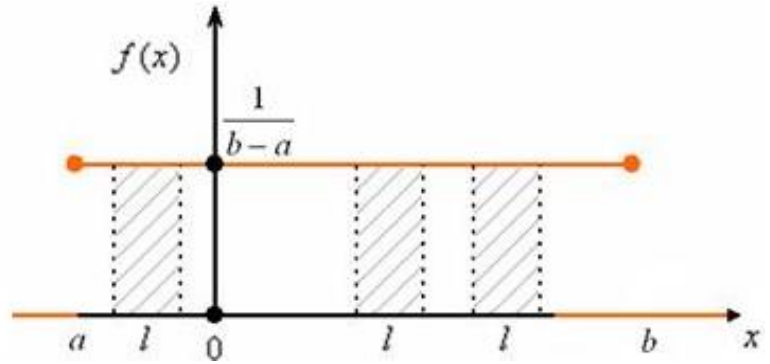


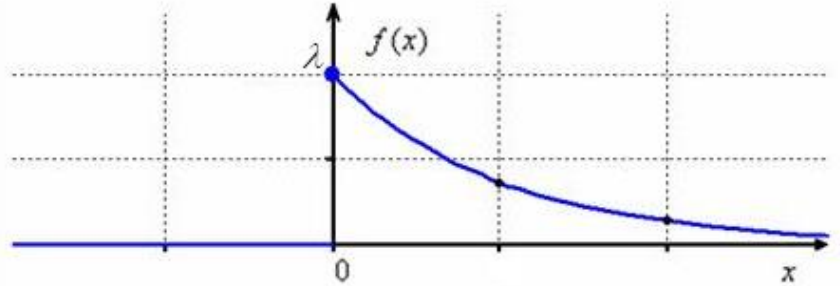
Рисунок 1 - График плотности распределения вероятностей

Для каждого закона распределения плотность имеет разный вид. На рисунке 2 представлены плотности равномерного, показательного, нормального законов распределения. Существуют и другие виды распределений, наиболее часто встречающиеся при моделировании (усеченное нормальное, логарифмически нормальное, экспоненциальные распределения Гаусса и Лапласа, распределения Релея, Коши и др.) [1, с. 22].

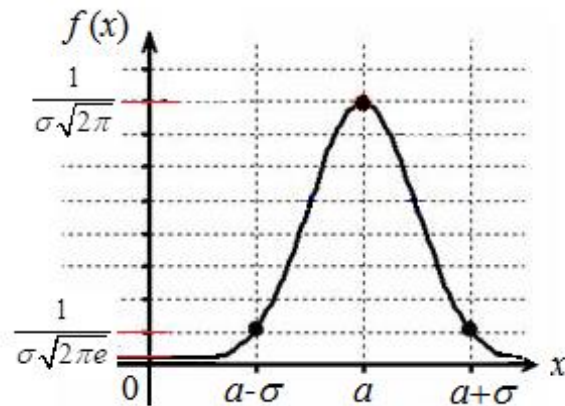
$$a) f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{если } x \in [a; b], \\ 0, & \text{если } x \notin [a; b]. \end{cases}$$



$$б) f(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < 0, \\ \lambda e^{-\lambda x}, & \text{если } x \geq 0, \end{cases}$$



$$в) f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}}$$



а) равномерный, б) показательный, в) нормальный

Рисунок 2 - Основные законы распределений непрерывных величин с приведенными функциями плотности вероятностей

При изучении каких-либо экономических, социальных, физических параметров (их значения зависят от условий, в которых протекает физическое явление) нахождение вероятности является ключевой задачей исследования. Вероятность позволяет определять, например, вероятность срока безотказной работы элемента или целого устройства технической системы, вероятность значений напряжения, меньших предельного показателя, и др. Кроме вероятности информативными характеристиками случайной величины являются определяющие числовые параметры («средние значения» случайных величин [2, с. 27]):

Математическое ожидание (формулы приведены для дискретных и непрерывных случайных величин соответственно):

$$MX = \sum_{i=1}^n x_i p_i,$$

$$MX = \int_{-\infty}^{+\infty} x f(x) dx.$$

Дисперсия:

$$MX = \sum_{i=1}^n x_i^2 p_i,$$

$$MX = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx.$$



Среднее квадратическое отклонение (показывает, насколько в среднем значения случайной величины отклоняются от своего среднего значения):

$$\sigma(X) = \sqrt{DX}.$$

Для того, чтобы по экспериментальным данным определить вероятность, числовые характеристики случайной величины, используется статистический анализ, который состоит в вычислении характеристик данных выборки и оценке по ним числовых характеристик случайной величины.

Статистическое распределение выборки имеет вид:

$$\begin{array}{cccccc} x_i & x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_k \\ n_i & n_1 & n_2 & n_3 & \dots & n_k \end{array}$$

Выборочная средняя:

$$\bar{x}_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i \cdot n_i$$

Характеристики случайной величины  
(несмещенные и состоятельные оценки):

$$\bar{x}_B \approx MX$$

Выборочная дисперсия:

$$D_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x}_B)^2 \cdot n_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k x_i^2 \cdot n_i - (\bar{x}_B)^2$$

Выборочное среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_B = \sqrt{D_B}$$

Исправленная выборочная дисперсия:

$$S^2 = \frac{n}{n-1} \cdot D_B \quad S^2 \approx DX$$

Исправленное выборочное среднее квадратическое отклонение:

$$S = \sqrt{S^2} \quad S \approx \sigma(X)$$

В реальных исследованиях чаще всего возникает несколько случайных величин. Например, в исследованиях прочностных характеристик технических конструкций возникает задача вычисления параметров распределения напряжений в зависимости от влияния и размеров конструкций и нагрузок.

Говорят, что в этом случае задан случайный вектор или многомерная случайная величина  $(X, Y, \dots, T)$ . Вероятность того, что  $X = x, Y = y, \dots, T = t$ , обозначается  $P(X = x, Y = y, \dots, T = t)$ . Плотность распределения вероятностей является функцией нескольких переменных  $f(x, y, \dots, t)$ . Сами случайные величины могут быть дискретные или непрерывные, независимые или зависимые.

Рассмотрим двумерный случайный вектор  $(X, Y)$ . В практических задачах рассматривают два вида зависимости переменной  $Y$  от фактора  $X$ . Либо между случайными величинами существует функциональная связь  $y = f(x)$ , когда каждому значению фактора  $X$  соответствует единственное значение зависимой переменной  $Y$ . Если же каждому значению  $X$  соответствует множество значений  $Y$ , то рассматривают и находят функциональную зависимость среднего значения  $Y$  от фактора  $X$ :  $\bar{y}_x = f(x)$ . Зависимость в среднем существует и может быть прогнозируема. Функция, характеризующая форму связи, называется функцией

регрессии. Зависимость называют статистической или корреляционной. Тесноту связи характеризует коэффициент корреляции между  $X$  и  $Y$ .

В задачах механики зависимость между переменными чаще всего функциональная, поскольку существуют формулы, определяющие такую зависимость, полученные при детерминистическом подходе в расчетах. Переменные величины, такие как, например, длина, диаметр стержня, внешняя нагрузка, внутреннее напряжение, определяющие функциональную зависимость, могут рассматриваться и как случайные. Этот подход обоснован следующими причинами: неоднородностью физико-механических свойств материалов в процессе изготовления конструкции; изменчивостью факторов, определяющих внешнее воздействие (собственный вес конструкции, изменение температур и др.) и нагрузки при монтаже и эксплуатации конструкции, при различных видах напряженного состояния (сжатии, растяжении, изгибе, кручении) [3, с. 41].

Между факторами и зависимой переменной существует вероятностная связь, описываемая законом распределения. Использование теории и методов теории вероятностей с целью определения вероятных значений одной переменной при заданной вероятности другой, вероятности предельно допустимых значений факторов, и др. составляет задачу вероятностного моделирования. Если значений случайной величины, заданных или полученных опытным путем, недостаточно для проведения вероятностного анализа, возникает необходимость смоделировать недостающую информацию путем генерирования случайных чисел методом Монте-Карло и др. Решение задач с использованием моделирования недостающей информации, называется вероятностно-статистическим моделированием. К статистическому моделированию прибегают не только в случаях недостаточности исходных данных, но и при упрощении сложных аналитических моделей реальных процессов и систем.

Приведем пример вероятностного моделирования. Рассмотрим задачу о нахождении распределения осевого момента сопротивления поперечного сечения прямоугольного стержня при известных параметрах распределения размера стержня [4, с. 6]. Известна функциональная

зависимость:  $w = \frac{b^3}{6}$  между осевым моментом  $w$  и длиной стержня  $b$ , который пусть имеет некий

разброс, или же значения которого распределены по нормальному закону  $b \in N(m_b, s_b)$ . Для реализации вероятностного моделирования используется теорема о плотности распределения непрерывной случайной величины, функционально зависящей от другой непрерывной случайной

величины. На первом этапе исследуем на монотонность заданную функцию:  $w = \varphi(b) = \frac{b^3}{6}$ .

Далее, находим обратную функцию к ней:

$$b = \varphi^{-1}(w) = \psi(w) = \sqrt[3]{6w},$$

затем производную обратной функции:

$$\frac{d\psi}{dw} = \psi'(w) = \frac{\sqrt[3]{6}}{3 \cdot \sqrt[3]{w^2}}.$$

В итоге, зная плотность распределения случайного аргумента  $f(b) = \frac{1}{s_b \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(b-m_b)^2}{2s_b^2}}$ ,

по формуле преобразования случайной величины  $g(y) = |\psi'(y)| \cdot f(\psi(y))$ , составляем искомую функцию:

$$g(w) = \frac{\sqrt[3]{6}}{3 \cdot \sqrt[3]{w^2}} \cdot f(\sqrt[3]{6w}) = \frac{\sqrt[3]{6}}{3 \sqrt[3]{w^2} \cdot s_b \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\sqrt[3]{6w}-m_b)^2}{2s_b^2}}.$$

### Библиографический список:

1. Петров Ю. В. Моделирование случайных величин: учебное пособие / Ю. В. Петров, С. Н. Аникин, С. А. Юхно; Балт. гос. техн. ун-т. – СПб., 2020. – 90 с. ISBN 978-5-907324-03-9.
2. Ноздрев В. Ф., Сенкевич А. А. Курс статистической физики. Учебное пособие. – М.: «Высшая школа», 1966. – 288 с.
3. Чирков В. П., Шавыкина М. В. Прикладные методы теории надежности в расчетах строительных конструкций : Конспект лекций Часть 1. – М.: МИИТ, 2010. – 67 с.
4. Кучерявый В. И. Вероятностные методы в расчетах прочности конструкций: учебное пособие / В. И. Кучерявый. – Ухта: Ухтинский индустриальный институт, 1993. – 89 с.

УДК 539.374

### Деформация гибкого стержня из никелида титана при нагреве под постоянной механической нагрузкой

Богданов Н. П.<sup>1</sup>, Демина М. Ю.<sup>2</sup>

*1 - Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

*2 - Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Предложен расчетно-экспериментальный метод определения продольной деформации гибкого стержня из никелида титана, возникающей в результате изгиба при термоциклировании под постоянной нагрузкой.

**Ключевые слова:** мартенситное превращение, упругая линия, гибкий стержень, радиус кривизны, продольная деформация.

Теория упругого изгиба стержней, применяемая в курсе сопротивления материалов, основана на предположении о малости перемещений при изгибе по сравнению с длиной стержня и радиусом его начальной кривизны. При этом прогиб линейно зависит от внешних сил [1].

При исследовании больших перемещений при упругом изгибе тонкого стержня или полоски не накладывается никаких ограничений на изменение конфигурации упругой линии изогнутого стержня, поэтому в отличие от малых перемещений, в этом случае нельзя определить реакции опор заранее, рассматривая стержень как абсолютно твердое тело [2]. Все опорные реакции (силы и моменты) будут существенно зависеть от значений искомым перемещений при изгибе, следовательно, задачи становятся статически неопределимыми и возникает проблема определения перемещений и деформаций [3] особенно при дополнительном изменении температуры тела.

В данной работе предлагается применить расчетно-экспериментальный метод для определения радиуса кривизны и деформации при изгибе гибкого тонкого стержня прямоугольного сечения, выполненного из никелида титана.

Стержень представляет собой прямоугольную пластину толщиной  $h = 0,60 \pm 0,05$  мм, шириной  $b = 18,31 \pm 0,08$  мм и длиной  $l = 77,16 \pm 0,08$  мм, выполненную из эквиаомного никелида титана с температурами фазовых переходов  $M_n = 62$  °С,  $M_k = 30$  °С,  $A_n = 44$  °С,  $A_k = 72$  °С.

Пластины подвергали плоскому изгибу под действием постоянной силы  $P$  при изменении температуры в интервалах мартенситных переходов. Пластины заземляли жестко по одной из коротких сторон, нагревали до температуры 90°С, нагружали постоянной сосредоточенной силой  $P$ , приложенной к противоположному незакрепленному концу (рис. 1), и охлаждали под нагрузкой до температуры ~24 °С, затем нагревали до 90°С. Нагрев выполняли при помощи инфракрасной лампы ИКЗК электрической мощностью 200 Вт. Нагрев осуществляли инфракрасной лампой со скоростью нагрева 2 градуса в минуту. При охлаждении под нагрузкой пластина изгибалась в вертикальной плоскости, изменяя кривизну, при нагреве под нагрузкой плоская форма пластины восстанавливалась.

Деформационный эффект при нагревании через интервал обратного мартенситного перехода фиксировали на видео. Камеру располагали таким образом, чтобы видеть показания

температуры нагрева, а изгиб пластины был зафиксирован во всех деталях. Образец закрепляли перед экраном с миллиметровой разметкой. Температуру измеряли с помощью электронного термометра с измерительным щупом на базе термопары из сплава хромель-алюмель. Для оцифровки экспериментальных данных - температуры и координат образца при изгибе - применяли принцип «стоп кадра» для заданных температур с интервалом  $5^{\circ}\text{C}$ . Скрин «стоп кадра» загружали в ПО «Grafula» - утилита для Windows, которая позволяет перевести в числовую форму данные, представленные в виде нарисованного или отсканированного графика (рис. 1).

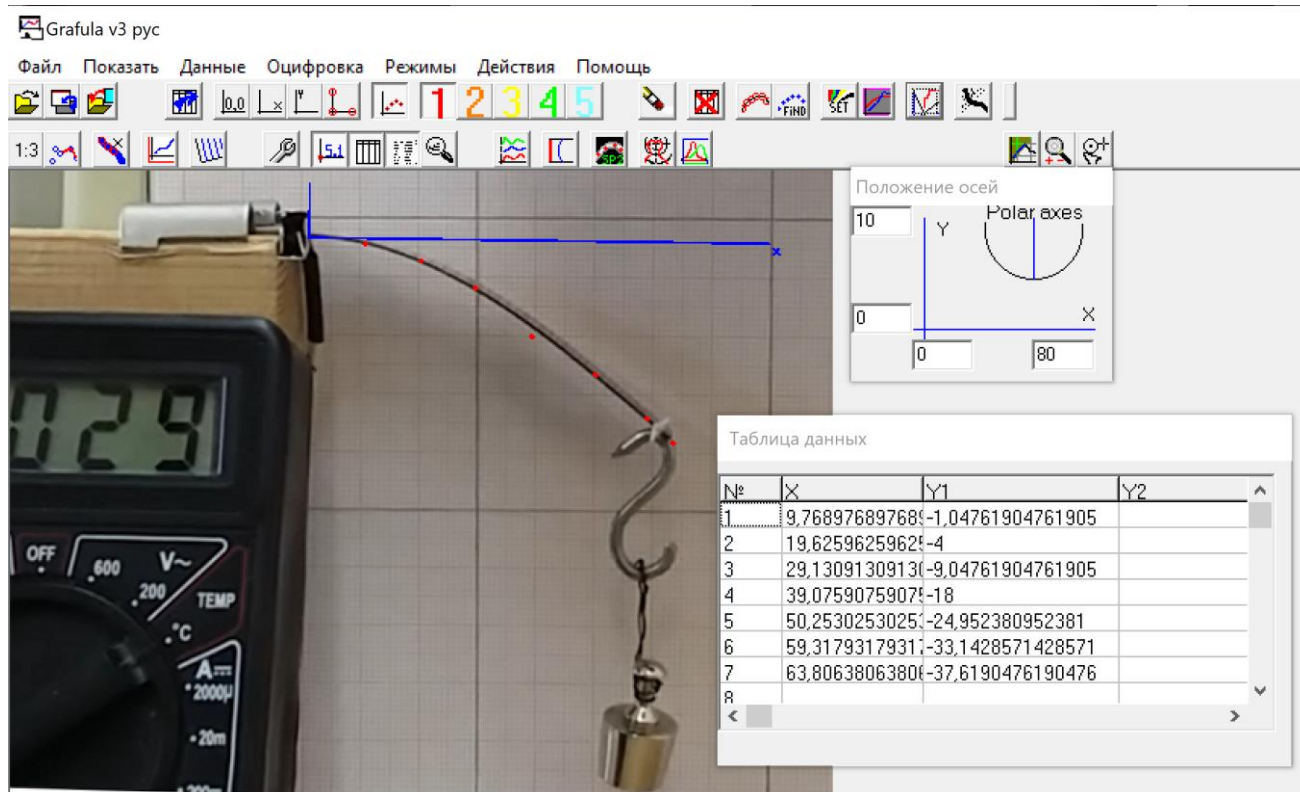


Рисунок 1 - Определение смещений поперечных сечений гибкого стержня при нагреве под постоянной нагрузкой

Далее выбирали начальную точку (точка жесткого закрепления образца), присвоив координаты (0,0). Координатную ось X направляли по горизонтали и Y - по вертикали. Пользуясь миллиметровой разметкой экрана, определяли максимальные значения по координатным осям ( $\text{MaxX}$  и  $\text{MaxY}$ ). Затем в окне программы расставляли по графику (профилю изгиба пластины) точки. Для этих точек автоматически вычислялись их координаты и записывались в таблицу, которую можно скопировать в любую другую программу, например, в Excel.

На рис. 2 показаны построенные в результате числовой обработки экспериментального видеоряда продольные оси гибкого стержня относительно недеформированного состояния при разных температурах на этапе нагрева для приложенной нагрузки  $P = 0,1 \text{ Н}$ . Полученные экспериментальные смещения точек в вертикальном и горизонтальном направлениях использовали для определения уравнения упругой линии.

В таблице 1 приведены уравнения упругой линии, полученные обработкой экспериментальных кривых, показанных на рис. 2. Для определения уравнения упругой линии использовали метод наименьших квадратов, реализованный в Microsoft Excel, аппроксимируя кривую полиномом третьей степени.

Полученные уравнения использовали для определения кривизны упругой линии в конкретной точке, т.к. между радиусом кривизны плоской кривой  $\rho$  и координатами ее точек  $y$  и  $z$  существует зависимость

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\frac{d^2 y}{dz^2}}{\left(1 + \left(\frac{dy}{dz}\right)^2\right)^{3/2}} \quad (1)$$

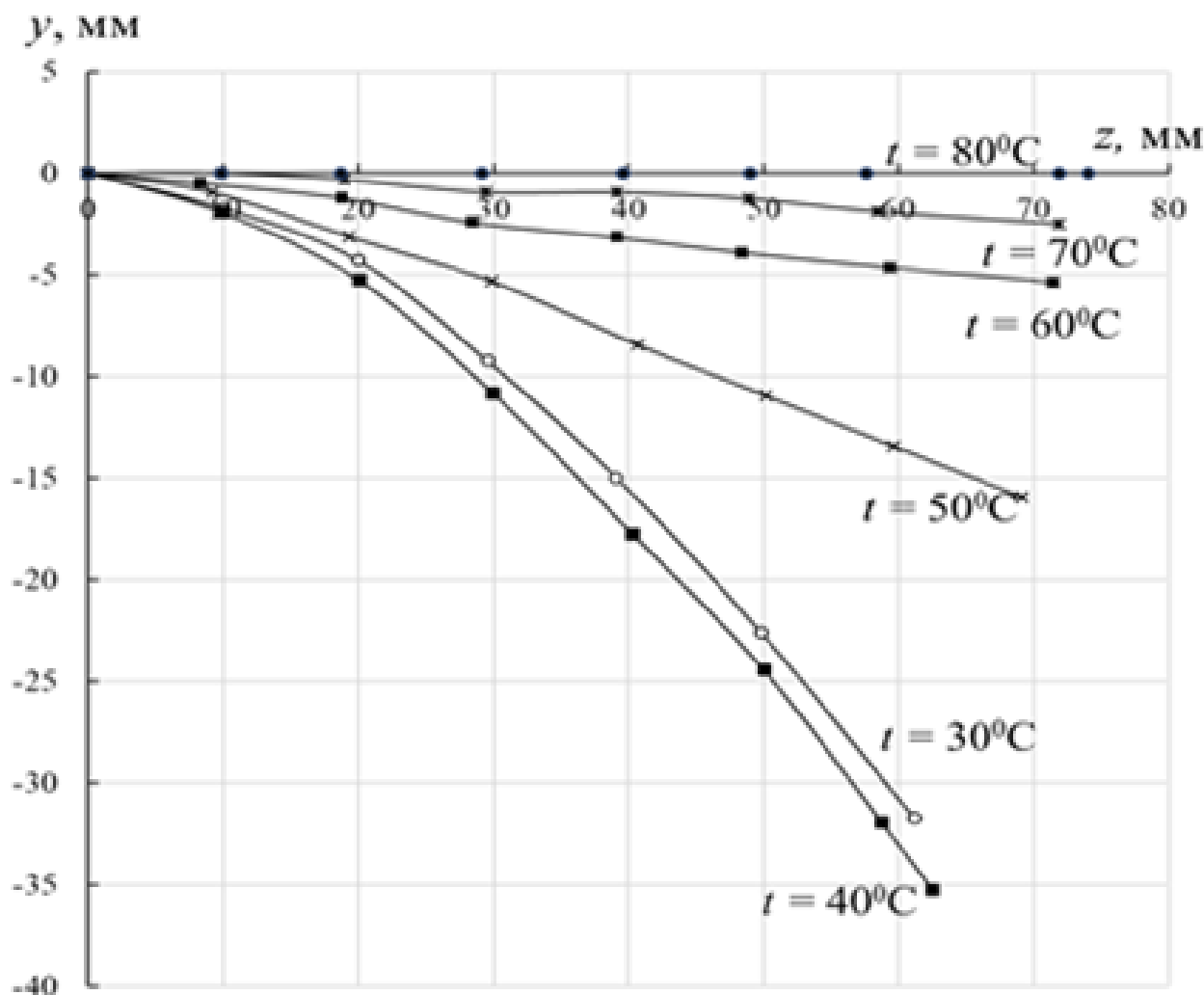


Рисунок 2 - Упругие линии заземленного стержня из никелида титана при нагреве под постоянной нагрузкой  $P = 0,1 \text{ Н}$

Таблица 1 – Уравнения упругой линии стержня при разных температурах

$t^{\circ}\text{C}$	Уравнение упругой линии стержня
30	$y = 4 \cdot 10^{-5} z^3 - 0,0106 z^2 - 0,0326 z - 0,0916$
40	$y = 4 \cdot 10^{-5} z^3 - 0,0103 z^2 - 0,087 z - 0,0035$
50	$y = 3 \cdot 10^{-5} z^3 - 0,004 z^2 - 0,0896 z + 0,053$
60	$y = 9 \cdot 10^{-6} z^3 - 0,0008 z^2 - 0,0646 z + 0,0515$
70	$y = -8 \cdot 10^{-7} z^3 - 0,002 z^2 - 0,0199 z + 0,0696$

Определив радиус кривизны  $\rho$ , вычисляли деформацию поверхности стержня в точке с заданной координатой  $z$

$$\varepsilon_{\max} = \frac{h}{2\rho} \quad (2)$$

Ниже приведена последовательность расчета деформации и напряжения для сечения с координатой  $z = 40$  мм относительно заделки на этапе нагрева под нагрузкой  $P = 0,1$  Н при температуре  $t = 30^{\circ}\text{C}$ .

Уравнение упругой линии для этой температуры имеет вид

$$y = 4 \cdot 10^{-5} z^3 - 0,0106z^2 - 0,0326z - 0,0916,$$

находим производные полинома

$$y'(z) = 12 \cdot 10^{-5} z^2 - 0,0212z - 0,0326,$$

$$y''(z) = 24 \cdot 10^{-5} z - 0,0212.$$

Определяем численные значения производных для координаты  $z = 40$  мм

$$y'(40) = 12 \cdot 10^{-5} \cdot 40^2 - 0,0212 \cdot 40 - 0,0326 = -0,6886,$$

$$y''(40) = 24 \cdot 10^{-5} \cdot 40 - 0,0212 = -0,0116,$$

которые подставляем в уравнение (1) для определения кривизны стержня

$$\frac{1}{\rho} = \frac{y''}{(1+(y')^2)^{3/2}} = \frac{-0,0116}{(1+0,6886^2)^{3/2}} = -0,00648 \text{ мм}^{-1}.$$

Максимальная деформация в сечении с координатой  $z = 40$  мм при температуре  $t = 30^{\circ}\text{C}$  и нагрузке  $P = 0,1$  Н составила

$$\varepsilon_{max} = \frac{h}{2\rho} = -0,0194\%.$$

Подобная последовательность расчетов была выполнена для точек с другими координатами  $z$  (таблица 2).

Таблица 2 – Максимальная деформация при изгибе гибкого стержня из никелида титана, %

$t^{\circ}\text{C}$	Положение поперечного сечения гибкого стержня относительно заделки, мм					
	10	20	30	40	50	60
30	-0,521	-0,390	-0,278	-0,194	-0,132	-0,087
40	-0,487	-0,359	-0,254	-0,176	-0,119	-0,077
50	-0,179	-0,123	-0,071	-0,0216	0,027	0,076
60	-0,031	-0,015	0,001	0,016	0,032	0,048
70	-0,013	-0,014	-0,016	-0,017	-0,019	-0,021

Продольная деформация гибкого стержня из никелида титана при нагреве через интервал мартенситного превращения под нагрузкой  $P = 0,1$  Н не превышала 1%, при этом смещение сечений от положения недеформированного состояния составляло значительную величину.

#### Библиографический список:

1. Тимошенко, С. П. Курс теории упругости [Текст] / С. П. Тимошенко. – М.: Изд-во «Наукова думка». - 1972. - 501 с.
2. Попов, Е. П. Теория и расчет гибких упругих стержней [Текст] / Е. П. Попов. – М.: Наука. – 1986. – 296 с.
3. Ландау, Л. Д. Теория упругости [Текст] / Л. Д. Ландау, Е. М. Лившиц. – М.: Наука. – 1987. – 248 с.

**Модель автоволнового процесса деформации для материалов с обратимыми мартенситными превращениями на основе структурно-аналитической мезомеханики**Малинин В. Г.<sup>1</sup>, Малинина Н. А.<sup>2</sup>, Малинин Г. В.<sup>3</sup>*1 - Орловский государственный аграрный университет, г. Орел, Россия**2 - Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия**3 - Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия*

**Аннотация.** В данной работе представлена модель автоволновой деформации, условиях инициирования обратимых превращений мартенситного типа. Предложена модель деформации при реализации обратимых мартенситных превращений с учетом процессов автоколебаний зон структурных концентраторов, позволяющая прогнозировать эффекты: памяти формы, пластичности превращения, ферроупругости и др. с учетом влияния вида напряженно-деформированного состояния и истории термомеханического нагружения.

**Ключевые слова:** Структурно-аналитическая мезомеханика, мартенситная неупругость, мартенситные реакции, мартенситные превращения, эффект памяти формы, эффект пластичности превращения, автоволновая пластичность.

В физике мартенситной неупругости накоплен значительный экспериментальный материал, особенно по эффектам памяти формы (ЭПФ) и пластичности превращения (ЭПП). Экспериментально доказано важнейшее положение кристаллофизики о преимущественном развитии неупругих деформаций почти исключительно посредством мартенситных реакций. Установлено, что в условиях инициирования механизма мартенситной неупругости порождаются чрезвычайно разнообразные и сложные функциональные свойства материала.

Предсказательная сила уравнений механики пластичности в отношении сложных способов механического, температурного и других воздействий на материал с фазовыми превращениями весьма посредственна. В случае, когда факторы механического характера конкурируют с эквивалентными по интенсивности факторами структурного и кристаллохимического происхождения, методы классической механики деформируемого твердого тела вообще не продуктивны [1,2]. Следует отметить, что основополагающие принципы механики пластичности (такие как постулаты Друккера и Одквиста), гипотеза о существовании поверхностей текучести и др., установленные в свое время на основе анализа экспериментального изучения поведения объектов, подобных железу или меди, не выдерживают критики применительно к материалам с фазовыми превращениями мартенситного типа в условиях нетривиальных режимов деформирования. Так, например, у никелида титана деформационное упрочнение может не определяться длиной пути деформирования, как у стали, а лишь конечным значением деформации. В этом же объекте деформация может инициировать выделение, а не поглощение энергии.

Поликристаллические материалы содержат в исходном состоянии сложную иерархически организованную систему структурных концентраторов, которые в процессе деформирования служат источниками локализованной энергии. Перераспределение энергетических флуктуаций обеспечивает инициирование процессов автоколебаний структурных концентраторов, влияющих на кинетику фазовых мартенситных превращений [1].

При традиционном подходе в теории деформации полагают, что определяющие соотношения могут быть сформулированы сразу на макроуровне, т.е. в измеряемых переменных механики деформируемого твердого тела. Любые физические законы, в том числе и на макромасштабном уровне, должны быть инвариантными по отношению к некоторым преобразованиям. В случае изотропных квазиоднородных тел эта инвариантность постулируется по отношению к однородным группам трансляции и поворота. Отсюда с неизбежностью вытекает, что определяющие соотношения должны выражаться через соответствующие инварианты тензоров напряжений и деформаций, например, через их вторые инварианты. Однако подобные требования находятся в полном противоречии с физикой

реализации процесса неупругой деформации. Например, если деформация осуществляется за счет фазовых мартенситных превращений, то процесс инвариантен по отношению только к подгруппе, описывающей процесс мартенситной реакции, не тождественной подгруппе скольжения или подгруппе двойникования [2, 3].

В тех случаях, когда имеют место простые схемы пропорционального нагружения, а тело макроскопически изотропно, несоответствия между требованиями инвариантности на микро- и макроуровнях оказываются несущественными и классические приемы механики пластичности дают удовлетворительные результаты. Когда же характер внешнего воздействия на материал является сложным, например, нагружение осуществляется с резким изломом траектории в пространстве напряжений, принцип макроскопической инвариантности приводит к противоречию с реально действующим процессом на микроуровне. Макроскопические свойства будут зависеть от пути температурно-механического воздействия. В результате макроскопические теории оказываются неспособными к верным прогнозам. Перечисленные трудности механики неупругой деформации носят принципиальный характер. Их нельзя преодолеть путем каких-либо изолированных формализаций или неизбежных, в таких случаях, уточнений. Рациональный выбор решения проблемы теории неупругой деформации в целом усматривается лишь в последовательно обоснованном учете физических процессов реального материала и в использовании достижений механики деформируемого твердого тела [2-3].

Как отмечалось в [2-3] при выборе методологии построения структурно-аналитической теории физической мезомеханики использовались достаточно общие принципы теоретической физики, которые нашли применение при анализе многоуровневых континуальных сред, с привлечением конструктивных идей как физики пластичности и разрушения, так и механики сплошных сред. Особенно привлекательны в этом плане методы непрерывной аппроксимации. Следуя [2, 3], рассмотрим вариант структурно-аналитической мезомеханики, отражающий доминантную роль процессов автоколебаний зон структурных концентраторов на микромасштабном уровне.

В результате мартенситных превращений на структурном масштабном уровне  $V_0$ , обусловленных процессами инициирования сдвиговых автоволн локализации мартенситных кристаллов в окрестности структурных концентраторов, возникает соответствующий источник деформаций. Описание генерации автоволн в активных средах обычно строится на учете конкуренции антагонистических факторов (активирующего и ингибирующего) [4,5]. При обратимых мартенситных превращениях активатором процесса является фазовая деформация  $\beta_{ik}^\Phi$  сдвиговой природы на структурном уровне  $V_0$ , а ингибитором – эффективная температура  $T^*$  [3]. Процессы деформации на микромасштабном уровне происходят за счет инициирования фазовых превращений мартенситного типа, плотность которых обозначим  $\Phi_{nl} = \Phi_{31}$ . Тензор фазовой деформации  $\beta_{ik}^\Phi$  можно представить в виде:

$$\beta_{ik}^\Phi = \beta_{31}^\Phi (\delta_{i3} \delta_{k1} + \delta_{i1} \delta_{k3}), \quad (1)$$

где  $\delta_{ik}$  – единичный тензор;  $\beta_{31}^\Phi$  – соответствующая компонента тензора, являющаяся инвариантом тензора структурного уровня  $V_0$ .

Развивая подход, предложенный Зуевым Л.Б. при анализе макромасштабного уровня [1], для микроструктурного уровня, следуя [2], предлагается уравнение сдвиговых автоволн, отражающее синергетический характер массопереноса при мартенситных превращениях в виде:

$$\dot{\Phi}_{31} = b_1 \dot{\beta}_{31}^\Phi + K_1 \Delta_\omega^* \Phi_{31}, \quad (2)$$

где  $\Phi_{31}$  – плотность мартенситной фазы, определяемая в окрестности зон структурных концентраторов в плоскости с нормалью  $\bar{n}$  в направлении  $\bar{l}$ ;  $\Delta_\omega^*$  – оператор Лапласа для локальной системы координат  $l, m, n$  [2, 3]. Первое слагаемое в уравнении (2) отражает скорость изменения деформации в процессе локального релаксационного акта в объеме  $V_0$ , связанного с перемещением границ области мартенситного превращения при релаксации локальных концентраторов напряжений. Второе слагаемое уравнения (2) отражает зарождение очага



мартенситного превращения на структурном расстоянии от существующего фронта фазового превращения, за счет релаксации концентраторов в этой области («заброска» деформации согласно терминологии [1, 4, 5]). Рассмотрим мартенситные превращения первого рода, отличающиеся тем, что в материнской фазе начинается процесс возникновения зародыша, массоперенос в объеме последнего всюду характеризуется одним и тем же тензором дисторсии  $D_{ik}$ . В дальнейшем, объем «новой» фазы в данном месте увеличивается за счет движения границы раздела фаз от центра зародыша в сторону материнского вещества, т.е. путем поглощения продукта превращения материнской фазы.

С целью моделирования процессов структурной эволюции и механизмов деформации на микроуровне обратимся к методикам [2–3]. Введем объем усреднения  $V_{of}$ , характеризующий долю объема  $V_o$ , с образовавшимися в нем индивидуальными мартенситными кристаллами. В качестве характеристики мартенситной фазы на микроуровне рассмотрим параметр  $\Phi_{31}$ , определяемый  $\Phi_{31} = V_{of}/V_o$ . Для микромасштабного уровня  $V_o$  определяющие соотношения представлены в виде:

$$\dot{\Phi}_{31} = -\dot{T}^* \left\{ \begin{array}{l} H(1 - \Phi_{\Sigma})H(-\dot{T}^*)H[M_s - \Phi(M_s - M_f) - T^*](M_s - M_f)^{-1} + \\ + H(\Phi)H(\dot{T}^*)H[T^* + \Phi(A_f - A_s) - A_f](A_f - A_s)^{-1} \end{array} \right\}; \quad (3)$$

$$T^* = T - \frac{T_0}{q_0} D_{ik} \tau'_{ik}; \quad (4)$$

$$\dot{\tau}'_{ik} = \dot{\tau}'_{31}(\delta_{i1}\delta_{k3} + \delta_{k1}\delta_{i3}); \quad D_{ik} = D_{31}(\delta_{i1}\delta_{k3} + \delta_{k1}\delta_{i3}), \quad (5)$$

$$\tau'_{ik} = \tau_{ik} - \Psi_{ik}; \quad \tau_{ik} = \alpha_{ip}\alpha_{kq}\tau_{pq}; \quad \Psi_{ik} = \alpha_{ip}\alpha_{kq}\Psi_{pq}. \quad (6)$$

В формулах (3) – (6) и далее, точка над символом означает производную по времени,  $\tau'_{ik}$  – эффективное напряжение;  $T$  – температура,  $\Phi_{\Sigma}$  – удельное количество мартенситной фазы на макроуровне,  $T^*$  – эффективная температура термодинамического равновесия фаз,  $q_0$  – тепловой эффект реакции,  $\alpha_{pi}$  – направляющие косинусы, переводящие локальную систему  $l, m, n$ , объема  $V_o$  в лабораторный базис  $x, y, z$ . Структурные напряжения  $\Psi_{ik}$  относятся к дальнедействующим ориентированным напряжениям микромасштабного уровня [2–3], которые инициируются на внутренних границах раздела аустенитной фазы. Тензоры  $\tau_{ik}$  и  $\sigma_{ik}$  характеризуют напряжения от внешних воздействий в локальном ( $\tau_{ik}$ ) и лабораторном ( $\sigma_{ik}$ ) базисах;  $\alpha_{ik}$  – соответствующие направляющие косинусы;  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера;  $M_s, A_s$  и  $M_f, A_f$  – характеристические температуры начала и конца фазовых превращений при прямой и обратной мартенситных реакциях, соответственно;  $H(x)$  – функция Хевисайда.

Мартенситные реакции сопровождаются созданием еще одного типа микронапряжений встречного характера. Причина их возникновения заключается в следующем. Появление зародыша новой фазы и его рост неизбежно связаны с генерацией поля напряжений из-за сопротивления материнской фазы. Такие поля микронапряжений всегда препятствуют образованию новой фазы. Как следствие, для продолжения роста кристалла новой фазы требуется дополнительный перегрев или переохлаждение. Это приводит к тому, что температуры начала и конца мартенситных реакций не совпадают, т.е.  $M_s > M_f$ , а  $A_f > A_s$ . В поликристаллах, содержащих дефекты структуры, мартенситная реакция сопровождается сложным наследованием дефектов и полей микронапряжений, сопровождающихся генерацией дополнительных встречных микронапряжений, стремящихся вызвать трансформацию решетки в обратном направлении. В некоторой степени названный эффект учитывается тем, что  $M_s > M_f$ ,  $A_f > A_s$ . Более корректное приближение достигается путем введения поля  $\Psi_{ik}$ , носящего тензорный характер и зависящего от истории деформирования на макромасштабном уровне, согласно (4) – (6).

Существенно подчеркнуть, что приведенные выше характерные свойства превращения удовлетворяют принципу воспроизводимости и практически не зависят от характера механического нагружения поликристалла. Следовательно, они являются полностью инвариантными как к кристаллофизическим преобразованиям, так и к напряженному состоянию. Данное утверждение является принципиальным [2] и позволяет

формулировать локальные инварианты превращения не обращаясь к глубокой физике явлений, а лишь принимая константы уравнений (3)–(6) в качестве фундаментальных эмпирических параметров. Отметим, что при расчете микродеформаций фазового превращения  $\beta_{ik}^\Phi$  согласно (2), величина  $\beta_{ik}^\Phi$  учитывает фактор развития фазовой деформации в условиях инициирования процессов автоколебаний. Кроме первого уровня усреднения (по объему  $V_0$ ), используется усреднение по второму масштабному уровню в объеме  $V \gg V_0$ . Ориентационное и статистическое усреднения по объемам  $V_0$  являются средствами перехода к описанию свойств кристаллических материалов. Согласно сказанному, выражения для тензора скорости макроскопических деформаций  $\dot{\varepsilon}_{ik}^\Phi$ , и количество мартенситной фазы  $\Phi_\Sigma$  представляются уравнениями:

$$\dot{\varepsilon}_{ik}^\Phi = \int_{\{s\}} \int_{\{\Omega\}} \varphi(s) f(\Omega) \alpha_{ip} \alpha_{kq} \dot{\beta}_{pq}^\Phi d^3 \Omega ds; \quad (7)$$

$$\Phi_\Sigma = \int_0^t \int_{\{\Omega\}} \int_{-\Gamma}^{\Gamma} \varphi(S_\Gamma) f(\Omega) \dot{\Phi} ds d^3 \Omega dt, \quad (8)$$

где  $f(\Omega)$  – функция плотности распределения по ориентациям  $\Omega$ , представительных объемов  $V_0$ ,  $\varphi(S_\Gamma)$  – функция плотности распределения по ширине (положению) гистерезиса фазовых превращений.

Названные функции должны удовлетворять естественным условиям нормировки:

$$\int_{\{s\}} \varphi(S_\Gamma) ds = 1; \varphi(S_\Gamma) \geq 0; \int_{\{\Omega\}} f(\Omega) d^3 \Omega = 1; f(\Omega) \geq 0. \quad (9)$$

#### **Библиографический список:**

1. Зуев, Л. Б. Автоволновая пластичность. Локализация и коллективные моды. – М.: Физматлит, 2018.
2. Лихачев, В.А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. – СПб.: Наука, 1993 г.-471с.
3. Malinin, V.G. Development of methods of structural-analytical mesomechanics that take into account the statistical properties of martensitic transformations in materials with shape memory effect Malinin V.G., Malinina N.A., Malinin G.V., Malukhina O.A. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering electronic edition. 2018. С. 012030.
4. Зуев Л. Б., Баранникова С.А., Лунев А.Г. От макро к микро. Масштабы пластической деформации. – Новосибирск: Наука, 2018. 131 с.
5. Баранникова С.А., Надежкин М.В., Зуев Л.Б. – Письма в ЖТФ. 2011 Т. 37. Вып. 16. С. 15-21. DOI: 10.1134/S1063785011080177

УДК 539.4

#### **Особенности разрушения нитридокремниевой керамики при пропорциональных траекториях нагружения в пространстве напряжений**

Малинина Н. А.<sup>1</sup>, Малинин В. Г.<sup>1</sup>, Малинин В. В.<sup>2</sup>

1 - Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

2 - ПАО «Туполев», г. Москва, Россия

**Аннотация.** В настоящее время широкое практическое применение находят неоксидные конструкционные керамические материалы. В то же время в литературе слабо освещены данные о закономерностях механических свойств, названных объектов при сложных термомеханических режимах воздействиях. Отсутствуют экспериментальные данные о влиянии вида напряженного состояния на прочность этих объектов. Не исследованы закономерности механического поведения рассматриваемых материалов при нестационарных термомеханических режимах нагружения. Данная работа снимает ряд вопросов по обозначенной теме.

**Ключевые слова:** некубические кристаллы, нитридкремниевая керамика, пропорциональные траектории нагружения, контур прочности, разрушение

Целью экспериментальных исследований, результаты которых описываются ниже, является изучение контура прочности пористой нитридкремниевой керамики при пропорциональных траекториях нагружения в пространстве напряжений.

Контур прочности является аналогом понятия поверхности нагружения и представляет собой плоскую замкнутую линию, соединяющую геометрические точки, характеризующие предельные значения компонент напряжений соответствующих моменту разрушения образца, в координатном поле  $\sqrt{3}\sigma_{31} - \sigma_{33}$  плоского напряженного состояния (рис.1).

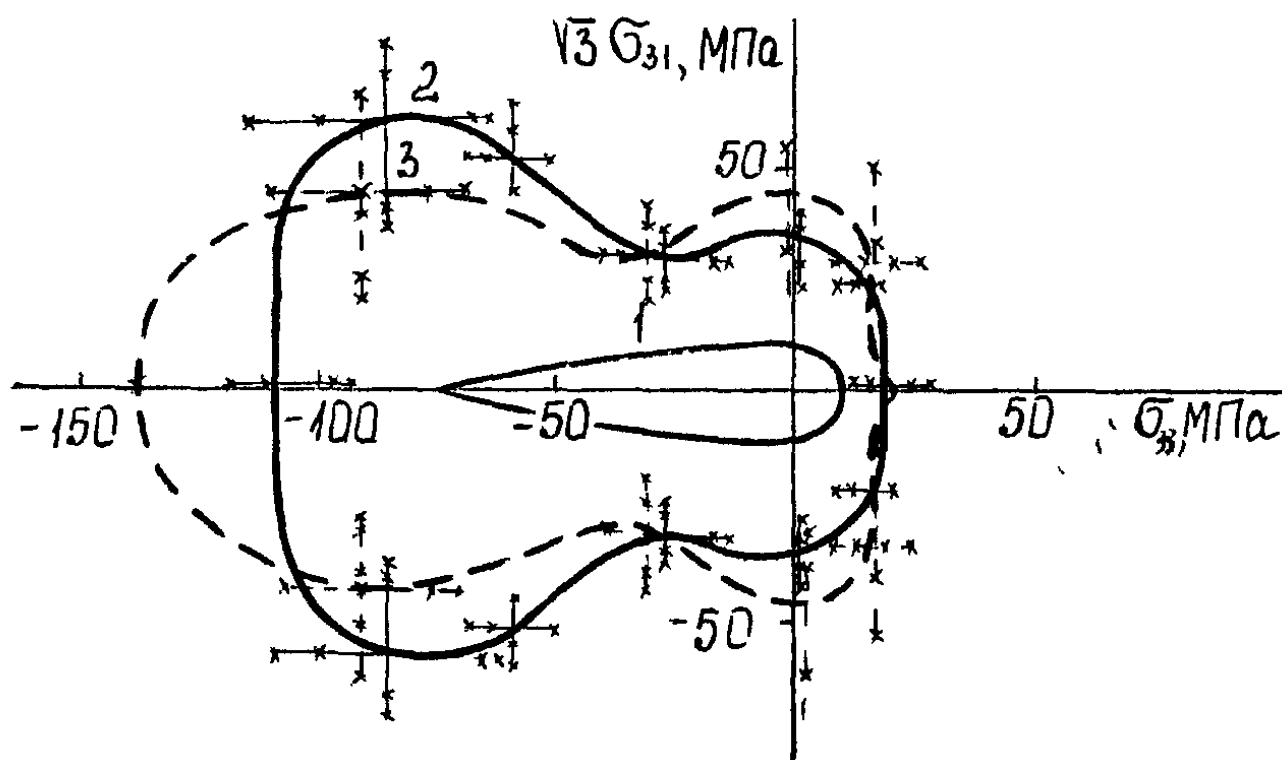


Рисунок 1 – Контур прочности нитридкремниевой керамики в координатах «нормальное напряжение  $\sigma_{33}$  – касательное напряжение  $\sqrt{3}\sigma_{31}$ » для температуры испытания 1173 К (1) и 293 К (2). Контур (3) относится к керамике, испытанной при 293 К после ее предварительного отжига в течение 15 мин при 1173 К

В качестве объекта исследования использовались тонкостенные трубчатые образцы из керамики  $Si_3N_4$ . Образцы из пористой нитридкремниевой керамики изготавливали методом термошликерного литья, последующей сушки и реакционного спекания при температуре 1823 К в среде газообразного азота. Подробно методика изготовления тонкостенных цилиндрических образцов из нитридкремниевой керамики изложена в [1,2].

При создании методики испытаний тонкостенных трубчатых образцов из нитридкремниевой керамики особое внимание уделялось строгому контролю соосности образца и осевой силы на всех этапах эксперимента. В опытах, содержащих комбинацию осевого сжатия и кручения, для передачи равномерного сжимающего усилия на рабочую часть через торцевые грани образца использовались тщательно подобранные полимерные прокладки. Специально спроектированная экспериментальная оснастка позволяла контролировать соблюдение соосности в процессе всего эксперимента.

Опыты проводились по восьми программам нагружения. Траектория нагружения задавалась в виде прямой линии в координатном поле  $\sigma_{33} - \sqrt{3}\sigma_{31}$ , и оценивалась коэффициентом К равным:  $K = \sqrt{3}\sigma_{31}/\sigma_{33}$ . Каждый опыт повторялся на шести образцах, а в

некоторых режимах для оценки наиболее характерных особенностей контура прочности использовалось десять образцов. Программа опытов содержала следующие режимы:

1. Чистое кручение ( $K = \infty$ , рис. 2).
2. Чистое растяжение ( $K = +\infty$ , рис. 3).
3. Чистое сжатие ( $K = -\infty$ , рис. 4).
4. Пропорциональное нагружение в условиях комбинации осевого сжатия и кручения по траектории равнонаклоненной к осям координат –  $\sigma_{33}$  и  $\sqrt{3}\sigma_{31}$  ( $K = -1$ , рис. 5).
5. Пропорциональное нагружение в условиях комбинации осевого растяжения и кручения по траектории наклоненной под углом  $30^\circ$  к оси –  $\sigma_{33}$  ( $K = 0,577$ ).
6. Пропорциональное нагружение в условиях комбинации осевого сжатия и кручения по траектории наклоненной под углом  $30^\circ$  к оси –  $\sigma_{33}$  ( $K = -0,577$ ).
7. Пропорциональное нагружение в условиях комбинации осевого растяжения и кручения по траектории наклоненной под углом  $60^\circ$  к оси –  $\sigma_{33}$  ( $K = 1,73$ ).
8. Пропорциональное нагружение в условиях комбинации осевого сжатия и кручения по траектории наклоненной под углом  $60^\circ$  к оси –  $\sigma_{33}$  ( $K = -1,73$ ).

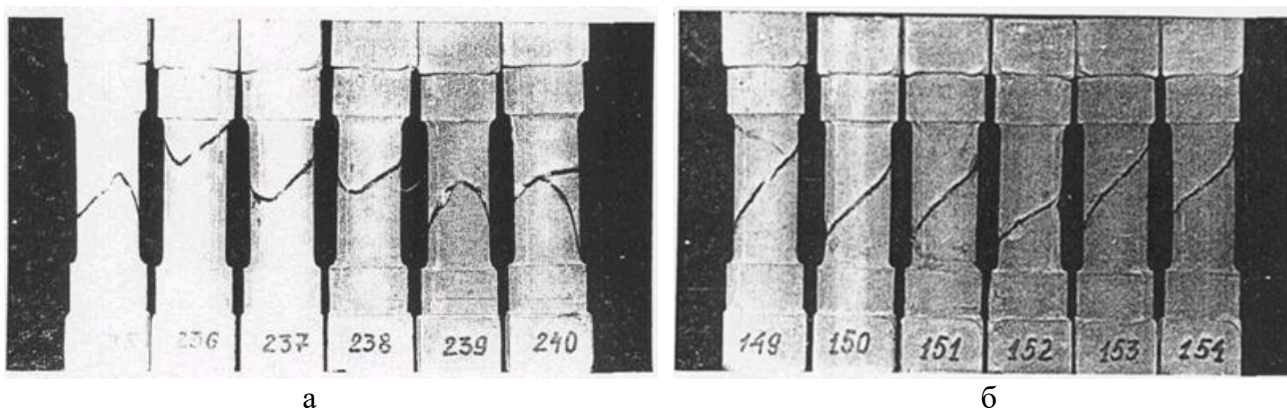


Рисунок 2 – Фотографии разрушенных образцов из пористой керамики на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  при кручении:  $K = \sqrt{3}\sigma_{31}/\sigma_{33} = \infty$ ; а – без предварительной термообработки; б – образцы предварительно выдерживали в вакууме при 1173 К в течение 15 мин

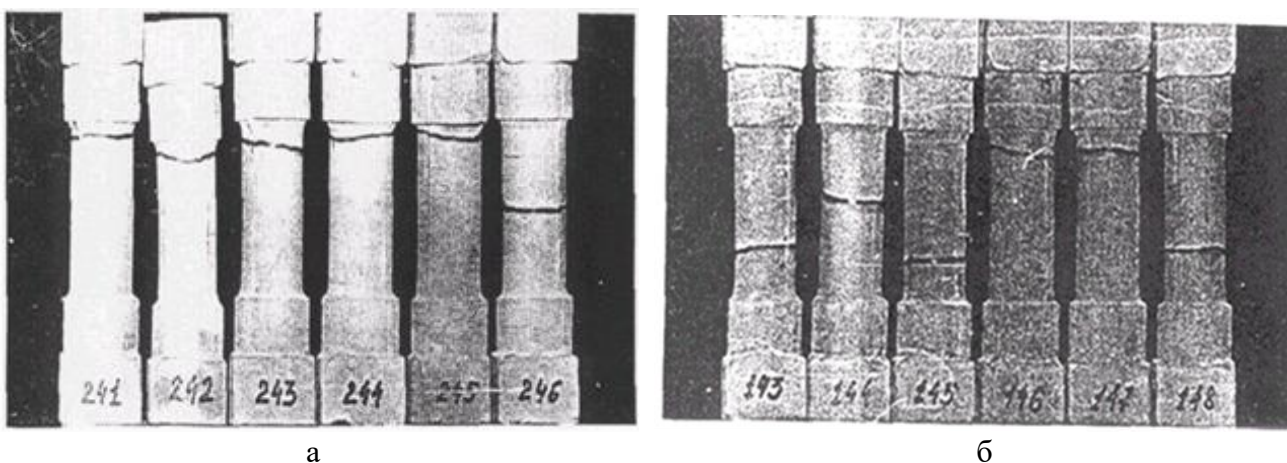


Рисунок 3 – Фотографии разрушенных керамических образцов при пропорциональном нагружении:  $K = 0$  (чистое растяжение)

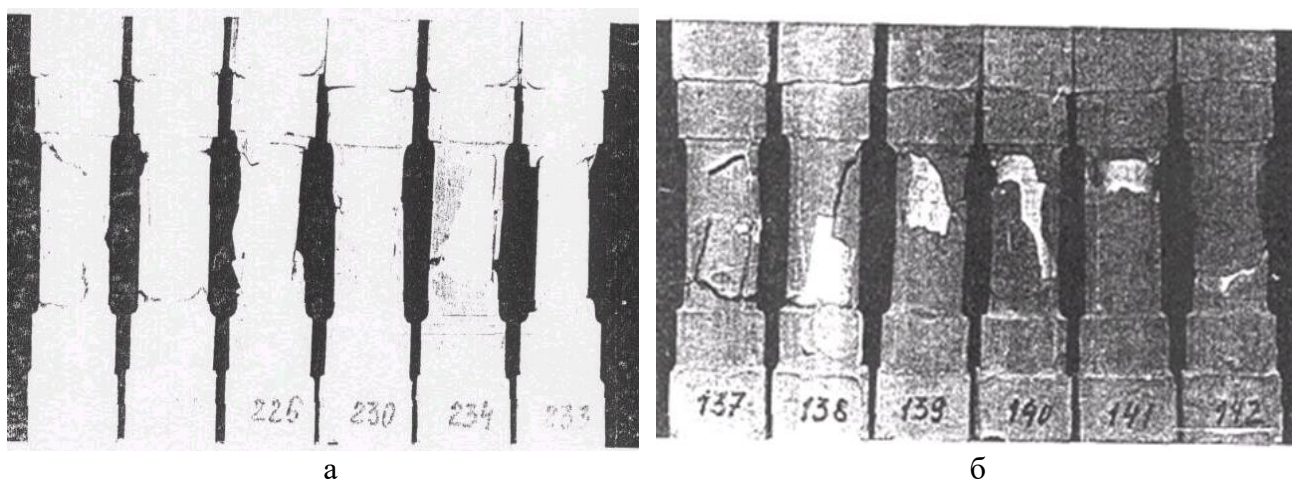


Рисунок 4 – Фотографии разрушенных керамических образцов при чистом сжатии

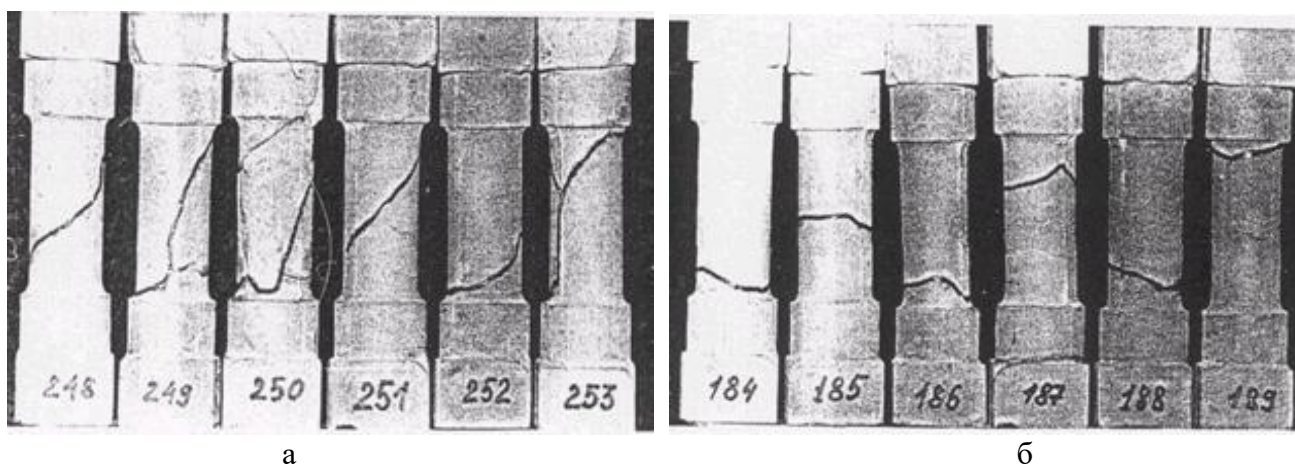


Рисунок 5 – Фотографии разрушенных керамических образцов при пропорциональном нагружении:  $K = -1$

Экспериментальные данные получены для двух постоянных температур: при комнатной температуре  $T=293$  К (контур 2 и 3 на рис. 1) и при повышенной температуре  $T=1173$  К (контур 1 на рис. 1) [2].

С целью исследования влияния режима предварительной терморелаксационной обработки для опытов, проводимых при комнатной температуре, были подготовлены две партии образцов. Одна партия образцов без термообработки, что соответствует данным для контура 2 на рис. 1. Другая партия образцов подвергалась предварительному кратковременному отжигу в свободном состоянии в течение пятнадцати минут при температуре  $T = 1173$  К. Экспериментальные данные для этой партии образцов соответствуют контуру прочности под номером 3, изображенному на рис. 1.

Анализируя полученные экспериментальные данные по влиянию термообработки на прочность керамических образцов, можно отметить изменение предельных значений напряжений при различных траекториях нагружения для образцов без предварительной термообработки (рис. 2, а – рис. 5, а) и для образцов после термообработки (рис. 2, б – рис. 5, б). Контур прочности термообработанных образцов более вытянут в направлении сжимающих напряжений, в тоже время, при чистом кручении наблюдаются большие значения предельных напряжений. Характерным признаком экспериментальных данных, полученных для партии тонкостенных образцов, подвергнутых предварительной термообработке, является существенно меньший разброс экспериментальных данных и тот факт, что разрушение происходило, как правило, в средней части тонкостенного цилиндра. В то время, как для партии образцов без термообработки, часто образующаяся макротрещина начинала развиваться в районе верхней или нижней галтели образца.

Наиболее интересные результаты относятся к данным, характеризующим контур прочности при комнатной температуре.

Анализируя данные, представленные на рис. 1 можно увидеть характерные вогнутости контура прочности, полученные при нагружении по лучевым траекториям при комбинации осевого сжатия и кручения. Экспериментальные данные по наличию вогнутости контура прочности проверялись на дополнительной партии образцов, и оказалось, разброс данных по точке, характеризующей максимальную вогнутость, был самым малым по сравнению с данными по другим траекториям нагружения. Контур прочности при повышенной температуре  $T = 1173$  К имеет сильно вытянутую форму в сторону, сжимающих напряжений (см. контур под номером 1 на рис. 1).

Представляет интерес анализ влияния вида напряженного состояния при пропорциональных траекториях нагружения на ориентацию и распределение макроскопических трещин. Коротко рассмотрим наиболее характерные признаки. При чистом кручении (траектория нагружения представлена в виде схемы в координатах  $\sigma_{33} - \sqrt{3}\sigma_{31}$ ) развивается, как правило, одна трещина (см. рис. 2, б), наклоненная к оси цилиндра примерно под углом  $45^\circ$ . На образцах без предварительной термообработки наблюдается отклонение от указанного правила, появляются трещины с различным наклоном, а также трещины, ориентированные в направлениях смежных плоскостей (рис. 2, а). Такой разброс экспериментальных данных говорит о сложной картине структурных напряжений и значительной роли макроконцентраторов напряжений [3, 4].

При нагружении в условиях чистого растяжения макротрещины ориентируются перпендикулярно растягивающей нагрузке (рис. 3 а, б). При чистом сжатии наблюдается множественный характер развития трещин, которые имеют ориентировку, близкую по направлению к оси цилиндра (рис. 4, б). Как правило, процесс разрушения сопровождается сильным треском. Ориентация и картина распределения макротрещин, при сложном напряженном состоянии, существенно зависит от траектории нагружения и представлена фотографиями разрушенных образцов при пропорциональных траекториях нагружения рис. 5. Сравнивая данные, изображенные на рис. 5 можно увидеть, как влияет ориентация траектории нагружения в пространстве напряжений на ориентацию возникающих макротрещин, а также на мозаику множественного развития трещин. Учитывая полученные экспериментальные результаты можно с уверенностью отметить существенную и нетривиальную роль вида напряженного состояния на разрушение нитрид кремниевой керамики. Полученные результаты целесообразно учитывать при построении критерия разрушения рассматриваемого материала [1].

#### **Библиографический список:**

1. Малинина, Н. А. Деформация и разрушение поликристаллов с микронапряжениями [Текст] / Малинина Н.А. - Монография - НовГУ им. Ярослава Мудрого. - Великий Новгород. 2003. - 160 с.
2. Голенков, В. А. Структурно-аналитическая мезомеханика и ее приложения [Текст] / В.А. Голенков, В.Г. Малинин, Н.А. Малинина. - Москва. Машиностроение, 2009, - 634 с.
3. Малинина, Н. А. Прочность нитридкремниевой керамики в условиях сложного напряженного состояния / Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения: материалы международной технической конференции модели (1–3 июня 2007 г., г. Самара). Орел: ОрелГТУ, 2007. - 51-52 с.
4. Малинина, Н. А. Анализ термической усталости второго рода методами структурно-аналитической мезомеханики / Актуальные проблемы динамики и прочности материалов и конструкций: модели, методы, решения: материалы международной технической конференции (1–3 июня 2007 г., г. Самара). - 46-48 с.

## Структурно-аналитический критерий разрушения для стальных тел с концентраторами напряжений

Малинин В. В.<sup>1</sup>, Малинин Г. В.<sup>2</sup>

*1 - ПАО «Туполев», г. Москва, Россия*

*2 - Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,  
г. Москва, Россия*

**Аннотация.** На основе методов структурно-аналитической мезомеханики сформулирован структурно-аналитический критерий разрушения. Особое внимание уделено формулировке уравнений для расчета эффективных напряжений в материалах, испытывающих высокие градиенты макронапряжений.

**Ключевые слова:** Критерий разрушения, концентратор напряжений, структурно-аналитическая мезомеханика.

Ключевым вопросом для хрупкого разрушения является вопрос о локальном критерии предельного состояния материала. Такой критерий определяет переход металла в некоторой критической области (в окрестности вершины трещины или надреза) из устойчивого состояния к разрушению. Такой критерий должен учитывать конкретный микромеханизм разрушения и структурное состояние материала. В то же время, рассматриваемый критерий существенно зависит от напряженно деформируемого состояния материала и истории нагружения в зоне локального разрушения.

В отличие от критериев классической механики разрушения, рассматривающих критическое состояние образца или детали с уже имеющейся трещиной, вышеуказанный критерий рассматривает критическое состояние материала без исходной трещины. Он основан на решении задачи о критической концентрации напряжений и не связан с необходимостью введения параметра длины, фиксирующей место начала разрушения стали. Зона локального разрушения в этом случае совпадает с положением локального пика растягивающих напряжений. Причем в случае реального материала наличие различного рода структурных дефектов вносит свой вклад в снижение прочности и зоны начала разрушения и не обязательно совпадает с положением пика напряжений. Однако можно выделить характерную "зону" протекания процесса локального разрушения, ограниченную критическим напряжением. В связи с изложенным выше, значительный научный и практический интерес представляет дальнейшее развитие силового критерия локального разрушения, не зависящего от внешних условий нагружения, дающего возможность физически обоснованно прогнозировать конструктивную прочность стальных деталей. Предлагаемый критерий основан на методах структурно-аналитической мезомеханики, магнитной памяти металла [1], результатах исследований критерия критического максимального растягивающего напряжения для различных марок сталей. Структурно-аналитический критерий разрушения предполагает, что для образования и развития трещины в окрестности макроконцентратора необходимо выполнение критерия разрушения, как на макромасштабном, так и на структурном (микро- и мезомасштабном) уровнях [2].

Рассмотрим случай разрушения детали с макроконцентратором по механизму отрыва. Будем считать, что разрушение отрывом в окрестности рассматриваемой локальной макроточки произойдет, если выполняются два условия: достижение максимальным локальным растягивающим напряжением  $\sigma_{11}^{\max}$  критического максимального локального растягивающего напряжения  $\sigma_F$  и обязательное выполнение критерия разрушения на структурном уровне, т.е. при достижении структурным параметром  $q_1$  значения  $q_{np}$ . Последнее означает, согласно [1, 2], возникновение в данном структурном элементе критической дефектной структуры, характеризуемой предельным состоянием зон структурных концентраторов. Принимая во внимание условие, согласно которому первоначальное распространение макротрещины будет происходить по площадке действия максимального нормального напряжения  $\sigma_{11}^{\max}$ ,

разрушение наступит только при выполнении двух названных выше условий. Сформулируем окончательный макроскопический критерий разрушения отрывом  $\Pi_0^M$  в виде:

$$\Pi_0^M = X(\sigma_{11}^{\max} - \sigma_F)X(q_1 - q_{np}) = 1, \quad (1)$$

$$\sigma_F = \sigma_e \left( 1 - \beta + \sqrt{\beta^2 + Lq_1q_2} \right), \quad \beta = L/d, \quad (2)$$

$$q_1 = S_i^{\max} / S_i^{cp}, \quad (3)$$

$$q_2 = (\text{grad}\sigma_{11} \cdot \text{Sign grad}\sigma_{11}) / \sigma_{11}, \quad (4)$$

$$L = [2/(\pi q_{np})](K_{1c} / \sigma_B)^2. \quad (5)$$

В формулах (1–5)  $X(x)$  – функция Хэвисайда,  $q_1$  – относительный инвариант векторной интенсивности  $S_i$  тензора магнитной дисторсии собственного магнитного поля рассеяния [2], который характеризует на структурном уровне повреждаемость металла на стадии упрочнения;

$q_2$  – относительный градиент первого главного напряжения, который находится из упругого-пластического решения соответствующей краевой задачи. Из формулы (5) следует, что эмпирический параметр  $L$  в предложенном критерии разрушения имеет размерность длины и выражен через известные характеристики материала: предел прочности  $\sigma_B$ , критический коэффициент интенсивности напряжений  $K_{1c}$  и структурный параметр  $q_{np}$ . Обозначения «max» и «cp» в (3) указывают на максимальное и среднее значения  $S_i$  в окрестности макроконцентратора;  $d$  – характерный размер макроконцентратора напряжений. Важным моментом при таком подходе является естественное объединение методов механики разрушения и методов технической диагностики структурно-механического состояния материала, которое позволяет создавать модели, учитывающие взаимовлияние внутренних структурных напряжений в зонах структурных концентраторов и макронапряжений в окрестности макроконцентратора. Характерно, что для описания прочностных свойств материала вблизи макроконцентраторов, необходимо введение двух комплексных параметров: структурно-механического ( $Lq_1q_2$ ) и структурно-геометрического ( $\beta = L/d$ ). Введенные комплексы отражают взаимное влияние структурных концентраторов и макроконцентраторов напряжений на прочностные свойства материала [1].

Согласно уравнению (1), тело разрушится, если  $\Pi_0^M = 1$ , и оно не будет разрушено, если  $\Pi_0^M = 0$ . Таким образом, разрушение тела с макроконцентраторами напряжений произойдет тогда, когда критического уровня достигнут максимальное локальное растягивающее напряжение  $\sigma_{11}^{\max}$  (в этом случае отражается силовой характер разрушения) и параметр  $q_1$ , который характеризует кинетическую природу разрушения. Отметим, что параметр  $q_{np}$  является константой материала, характеризует степень структурной неоднородности и предельную деформационную способность металла в зонах структурных концентраторов напряжений, определяется методом магнитной памяти металла.

Анализируя полученные результаты расчета по классическому (критерий максимальных нормальных напряжений), градиентному [2] и структурно-аналитическому критериям [1] разрушения в сравнении с экспериментальными данными можно отметить, что результаты расчета по классическому критерию разрушения дают значения среднего номинального напряжения  $\bar{\sigma}$  на 50% – 75% ниже экспериментальных данных. Расчет по градиентному критерию разрушения приводит к значению  $\bar{\sigma}$  на 14,6% – 30% ниже экспериментальных данных. Отклонение результатов расчета по структурно-аналитическому критерию разрушения от данных, полученных при испытаниях, находится в пределах от 0,5 до 5%, что практически совпадает с разбросом в экспериментальных исследованиях.

**Библиографический список:**



1. Малинин, В. В. Структурно-механический подход в мезомеханике разрушения. / В. В. Малинин //Справочник. Инженерный журнал. №6-2011, С. 52-56.
2. Малинин, В. Г., Малинин В. В. Двухуровневый структурно-механический градиентный критерий разрушения //Фундаментальные и прикладные проблемы техники) – 2008. – с. 8-13.

УДК 539.3

### **Тензорные характеристики собственного магнитного поля рассеивания, как инструмент прочностной оценки элементов конструкций**

Малинин В. Г.<sup>1</sup>, Малинин В. В.<sup>2</sup>, Савич В. Л.<sup>3</sup>, Димов А. А.<sup>1</sup>, Отев К. С.<sup>3</sup>

*1 - Орловский государственный аграрный университет, г. Орел, Россия*

*2 - ПАО «Туполев», г. Москва, Россия*

*3 - Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Введены инвариантные параметры тензора собственного магнитного поля рассеивания, позволяющие контролировать прочностные свойства металлических изделий в процессе их эксплуатации.

**Ключевые слова:** Структурно-аналитическая мезомеханика, деформация, магнитное поле, прочностная оценка, метод магнитной памяти.

Важной задачей является создание экспериментально-теоретических моделей, отражающих основные закономерности эволюции структурных напряжений, основанных на регистрации параметров СМПР. Необходимо введение соответствующих понятийных представлений и математического инструментария.

Вектор напряженности собственного магнитного поля рассеивания. Измеряя напряженность магнитного поля  $H_i$ , в различных точках деформированного тела можно определить распределение  $H_i$  по координатам исследуемого изделия. Для проверки существования СМПР в образце, после деформирования материала, как векторного объекта, были выполнены эксперименты на тонких стальных пластинах. Исследовались пластины без концентраторов и с различными макроконцентраторами в виде центральных круглых и эллиптических отверстий, боковых надрезов различной конфигурации из стали 3, стали 45, стали 09Г2С. Использовался разработанный предприятием ООО «Энергодиагностика» серийно выпускаемый специализированный прибор контроля СМПР и трехкомпонентный феррозондовый датчик. В частности, применялся измеритель концентрации напряжений магнитометрический ИКН-1М-4, с регистрирующим устройством на базе микропроцессора. Измерения  $H_i$  выполняли в различных точках образца, и в каждой точке сканировали компоненты вектора  $H_i$ , поворачивая датчик на углы  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$  градусов. Каждый опыт повторили три раза. Результаты измерений подтвердили инвариантность  $H_i$ , т.е. выполнялся закон сохранения тензора первого ранга при повороте системы координат

$$H'_i = \alpha_{ik} H_k, \quad (1)$$

где  $\alpha_{ik}$  - направляющие косинусы.

Погрешность измерений по оценки инварианта  $(H_i H_i)_{1/2}$  не превышала (1-3)%, а по отдельным компонентам  $H_i$  разброс не превышал 5%. Причем в тех местах, где имелась большая пластическая деформация, разброс был самый маленький. Полученные данные убеждают, что методики измерения СМПР вполне удовлетворяют задачам исследования структурно-механического состояния материала.

Тензор дисторсии собственного магнитного поля рассеивания. Следующий этап экспериментальных исследований заключался в измерении компонент СМПР по всей рабочей части деформируемой пластины в процессе нагружения. Размеры рабочей части пластины составляли 60 x 120 x 2мм. Наносилась квадратная сетка с размером ячейки 5 x 5мм. Измерения компонент вектора  $H_i$  проводили в узлах сетки, общее количество составляло  $11 \times 11 = 121$  узел. В каждом узле производили три измерения компонент  $H_i$ , далее выполнялась обычная статистическая обработка. Вся диаграмма растяжения пластины получалась в условиях ступенчатого нагружения, количество ступеней было 10-12, вплоть до разрушения. Общее

количество измерений в каждом опыте находилось в пределах 1,5-2 тыс. Полученные результаты по распределению векторного поля  $H_i$  позволили ввести в рассмотрение тензор дисторсии СМПР как градиент от вектора напряженности  $H_i$  по формуле

$$H_{ik} = \nabla_i H_k, \quad (2)$$

где  $\nabla_i$  - оператор Набла.

Обработка опытных данных с помощью формулы (2), позволила получить экспериментально обоснованный математический объект, характеризующий неоднородность СМПР. Следующий шаг заключался в экспериментальной проверки параметров  $H_{ik}$  (2) на предмет сохранения  $H_{ik}$  как тензора второго ранга при повороте системы координат на углы:  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $90^\circ$  градусов. Результаты обработки полученных данных показали удовлетворительное соответствие закону сохранения:

$$H'_{ik} = \alpha_{ip} \alpha_{kq} H_{pq}. \quad (3)$$

Разброс по величинам первого, второго и третьего инвариантов  $H_{ik}$  находился в пределах 15%, что подтвердило тензорный характер параметров  $H_{ik}$ . Необходимо отметить, что данные экспериментальные исследования требовали создания оригинальных оснасток, каждый эксперимент длился 4-5 часов. В течении трех лет было выполнено большое количество опытов, подтвердившие тензорный характер введенного параметра  $H_{ik}$ , названного дисторсией собственного магнитного поля рассеивания.

Следующим шагом было введение на основе тензора дисторсии  $H_{ik}$  симметричного  $H_{ik}^s$  и антисимметричного  $H_{ik}^a$  тензоров:

$$H_{ik}^s = \frac{1}{2}(\nabla_i H_k + \nabla_k H_i); \quad H_{ik}^a = \frac{1}{2}(\nabla_i H_k - \nabla_k H_i). \quad (4)$$

Введение  $H_{ik}^s$  позволяет развивать симметричную структурную механику в соответствии с традиционной симметричной механикой деформируемого твердого тела. Введение параметра  $H_{ik}^a$  открывает возможности развития структурных моделей, учитывающих моментные структурные напряжения и соответствующие деформации изгиба-кручения.

Тензорная интенсивность собственного магнитного поля рассеивания. Экспериментальные исследования, позволяют выделить из полного тензора дисторсии  $H_{ik}$  (3) физический значимый тензор  $Z_{ik}$ , названный тензорной интенсивностью СМПР в виде:

$$Z_{ik} = Z_{13} \delta_{i1} \delta_{k3} + Z_{23} \delta_{i2} \delta_{k3}, \quad (5)$$

где  $Z_{13} = H_{13}$ ;  $Z_{23} = H_{23}$ ;  $\delta_{ik}$  - символ Кронекера.

Учитывая, что в данной работе используются симметричный тензор напряжений целесообразно построить симметричный тензор  $Z_{ik}^s = S_{ik}$  :

$$S_{ik} = \frac{1}{2} H_{13} (\delta_{i1} \delta_{k3} + \delta_{i3} \delta_{k1}) + \frac{1}{2} H_{23} (\delta_{i2} \delta_{k3} + \delta_{i3} \delta_{k2}). \quad (6)$$

Согласно (6)  $S_{ik}$  можно представить в виде:

$$S_{ik} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{1}{2} H_{13} \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} H_{23} \\ \frac{1}{2} H_{13} & \frac{1}{2} H_{13} & 0 \end{pmatrix};$$

Кубическое уравнение для определения главных значений  $S_{ik}^s (k=1,2,3)$  имеет вид:

$$S_k^3 - J_1^s S_k^2 - J_2^s S_k - J_3^s = 0;$$

где:  $J_1^S = S_{ii} = 0; \quad J_3^S = |S_{ij}| = 0; \quad J_2^S = \frac{1}{2} S_{ik} S_{ik} = \frac{1}{4} (S_{13}^2 + S_{23}^2); \quad S_{13} = H_{13}; S_{23} = H_{23}$

Решая кубическое уравнение, получим следующие главные значения тензора  $S_{ik}$

$$S_{1,3} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{S_{13}^2 + S_{23}^2}; \quad S_2 = 0; \quad S_1 \geq S_2 \geq S_3.$$

Интенсивность  $S_i$  тензора  $S_{ik}$ , а также параметр  $S_{\max}^r$  имеет вид:

$$S_i = \sqrt{J_2^S} = \frac{1}{2} \sqrt{S_{13}^2 + S_{23}^2}; \quad S_{\max}^r = \frac{1}{2} (S_1 - S_3) = \frac{1}{2} \sqrt{S_{13}^2 + S_{23}^2}. \quad (7)$$

Анализируя соотношения (7) можно отметить, что симметричная часть тензорной интенсивности СМНР (6) имеет отличным от нуля только второй инвариант  $\frac{1}{2} S_{ik} S_{ik}$ , через

который выражены главные значения  $S_1, S_3$ . Инвариант  $S_i = \frac{1}{2} (S_{ik} S_{ik})^{1/2}$  в окрестности зоны структурного концентратора, с точностью до постоянного коэффициента, совпадает с параметром  $K_{ин}$  названным градиентом нормальной составляющей собственного магнитного поля  $K_{ин}$  [2]. тензор  $Z_{ik}$ , названный тензорной интенсивностью СМНР в виде:

Параметр  $K_{ин}$  в методе магнитной памяти (ММП) играет ключевую роль как диагностический параметр для оценки состояния металла в зонах концентрации напряжений (ЗКН) [1,2].

#### **Библиографический список:**

1. Лихачев В. А., Малинин В.Г. Структурно-аналитическая теория прочности. – СПб.: Наука, 1995. – 471с.
2. Дубов А.А., Дубова А.А. Колокольников С.М. Метод магнитной памяти и приборы контроля. Учебное пособие. – М.: «Гиссо», 2006. 332с.

УДК 539.4.013.3

#### **Аналитический расчет диаграмм деформации на основе структурно-аналитической концепции физической мезомеханики**

Малинин В. Г., Малинина Н. А., Савич В. Л., Отев К. С.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

**Аннотация.** В статье рассматривается новая концепция пластичности, учитывающая многоуровневый характер деформации, а также процессы самоорганизации и трансляционно-ротационные методы деформации. Приводится методика аналитического описания диаграмм деформации при одноосном нагружении макроскопически изотропных поликристаллов.

**Ключевые слова:** деформация, напряжения, двухуровневая модель, диаграмма деформации, статистические свойства.

В анализируемых работах [1-4] предложена новая концепция пластичности, учитывающая многоуровневый характер деформации, а также процессы самоорганизации и трансляционно-ротационные методы деформации.

Однако, конкретные расчеты диаграмм деформирования в рамках этой теории выполнены только численными методами. Отсутствуют также исследования, по оценке возможностей различных структурно-аналитических моделей для описания диаграммы пластической деформации.

В настоящей работе идеология указанных выше источников использована для аналитического описания диаграмм деформации при одноосном нагружении макроскопически

изотропных поликристаллов. С целью анализа возможностей различных моделей использовались два варианта определяющих соотношений.

Два варианта относятся к двухуровневому представлению процесса зарождения и развития атермической пластичности, (учитываются микро – и макромасштабные структурные уровни). Отличие заключается в том, что в одной модели учитывается статический разброс по величине начального напряжения течения  $\tau_0^s$ , а в другой нет.

В моделях на микроуровне учитывалось деформационное упрочнение, возврат и влияние температурного фактора. Изменение структуры в процессе активного нагружения описывалось определяющими уравнениями из [1: 1.89а, 1.89б, 1.18].

Исследовался математический объект, близкий по свойствам к стали СТ.45 с константами:  $A_a=8 \cdot 10^{-4} \text{с}^{-1}$ ;  $W_0=167 \text{кДж/моль}$ ;  $\chi=7,9 \cdot 10^{-2} \text{МПа/К}$ ;  $r_0=0,3 \text{с}^{-1}$ ,  $\tau^d=150 \text{МПа}$ ;  $\tau^0=100 \text{МПа}$ . Скорость нагружения выбиралась постоянной  $\sigma_{33}=0,5 \text{МПа/сек}$ . Отметим, что  $\tau^d$  характеризует начальное динамическое напряжение течения, т.е. при  $\sigma_{33} \rightarrow \infty$ , а  $\tau^0$  – его статическое значение, соответствующее  $\sigma_{33} \rightarrow 0$ . Скорость изменения температуры  $T$  также предполагалась постоянной, в том числе при изотермическом нагружении  $T=0$ .

Для двухуровневой модели без учета статических свойств по  $\tau^s$ :

$$\dot{\varepsilon}_{33} = \frac{1}{3} A_a \sqrt{1-\alpha(t)} \left( (\dot{\varepsilon}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33}) + r_0 e^{-W_0/kT} (\sigma_{33} - \frac{3}{2} \rho_{33}) + \chi \dot{T} - r_0 e^{-W_0/kT} \tau^0 \right) - \frac{1}{5} a \sqrt{1-\alpha(t)} \left( (\dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33}) + r_0 e^{-W_0/kT} (\sigma_{33} - \frac{3}{2} \rho_{33}) + \chi \dot{T} - r_0 e^{-W_0/kT} \tau^0 \right). \quad (1)$$

$$\alpha(t) = \frac{\frac{1}{r_0 e^{-W_0/kT}} e^{-tr_0 e^{-W_0/kT}} (r_0 e^{-W_0/kT} (\tau^d - \tau^0) + \chi \dot{T}) + \tau^0 - \frac{\chi \dot{T}}{r_0 e^{-W_0/kT}}}{\sigma_{33} t} \quad (2)$$

Предел пропорциональности  $\sigma_{33}^{mp}$  в данном случае будет отражаться формулой:

$$\sigma_{33}^{mp} = \frac{\frac{2(\chi \dot{T} - r_0 e^{-W_0/kT})}{\sigma_{33}} W\{2e^{\frac{\sigma_{33}}{r_0 e^{-W_0/kT}} (r_0 e^{-W_0/kT} (\tau^d - \tau^0) + \chi \dot{T}) / \sigma_{33}}\}}{r_0 e^{-W_0/kT}} - \frac{2\chi \dot{T}}{r_0 e^{-W_0/kT}} + 2\tau^0 \quad (3)$$

В соотношениях 1-3 и далее точка над символом означает производную по времени;  $\rho_{33}$  – компонента ориентированных структурных напряжений;  $W\{x\}$  есть функция, обозначающая решение уравнения вида  $y=x \cdot e^x$ . Численное решение уравнения 3 получено посредством применения программы Mathcad 6.0 PLUS.

Предел текучести  $\sigma_{0,2}$  определяется из уравнения 4:

$$\sigma_{0,2} = \sigma_{33} \left\{ 0,002 - \int_{t_1}^{t_2} \varepsilon_{33} dt \right\} \quad (4)$$

где  $t_1$  – момент начала микропластической деформации и определяется из условия пластичности на микроуровне,  $t_2$  – момент времени, соответствующий значению макропластической деформации  $\varepsilon_{33} = 0,2\%$ . Уравнение численно решается средствами компьютерного приложения Mathcad 6.0 PLUS. Результаты расчета по соотношениям 1 – 4 представлены на рисунке кривой 1.

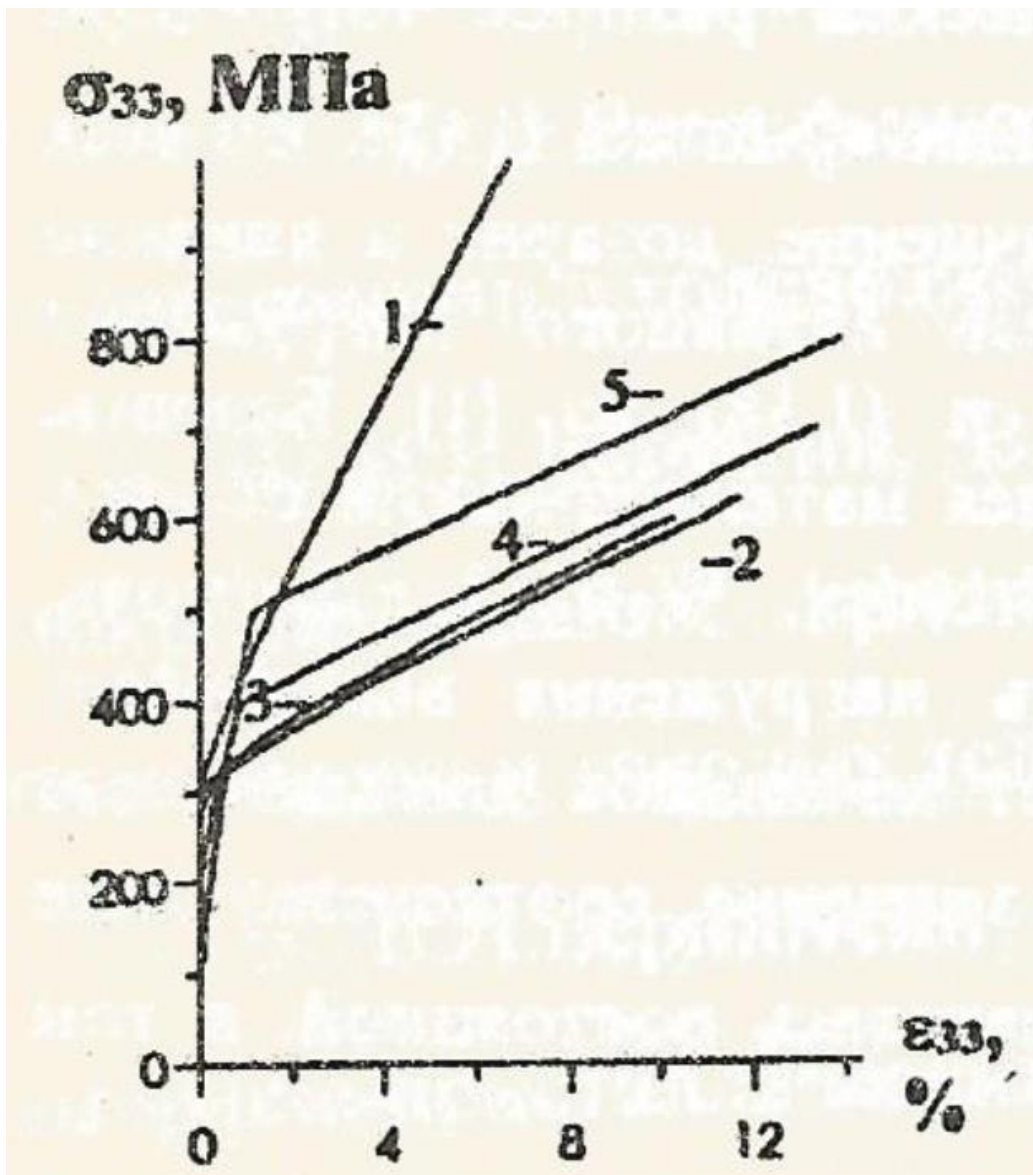


Рисунок 1 – Результаты расчетов

Для построения кривой напряжение-деформация на основе двухуровневой модели с учетом статистических свойств по пределам текучести использовались те же константы. Как отмечалось, новым по сравнению с предыдущей моделью является введение константы  $\delta\tau$ , характеризующей максимальное отклонение по начальному напряжению  $\tau^0$ . Это повлекло за собой необходимость расчета двух областей пластической деформации на мезоуровне – переходную зону упругопластического течения (когда  $\sigma_{33}^{np}(\delta\tau) \leq \sigma_{33} < \sigma_{кр}$ ) и зону развитой пластической деформации при ( $\sigma_{33} > \sigma_{кр}$ ) здесь и далее  $\sigma_{кр}$  – критическое значение эффективного напряжения  $\sigma_{33}$ , ниже которого на мезоуровне содержатся объемы, где структурные концентраторы не вступили в пластическое течение и с ростом  $\sigma_{33}$  происходит их эстафетное включение в пластическую деформацию. При напряжениях выше  $\sigma_{кр}$  на мезомасштабном уровне дополнительно появляются объемы, в которых весь ансамбль структурных концентраторов уже активизирован и в них пластическое течение носит более однородный и развитый характер.

Расчет  $\sigma_{кр}$  производится по формуле 3, путем замены величины  $\tau^0$  на  $\tau^0 + \delta\tau$ , а значение  $\sigma_{33}^{np}(\delta\tau)$  – также по 3 при замене  $\tau^0$  на  $\tau^0 - \delta\tau$ . Аналитическое соотношение для  $\varepsilon_{33}$ , полученное на основе этой модели, выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}
\dot{\varepsilon}_{33} = & \left\{ \left[ \frac{1}{7} \sqrt{1-\alpha(t)} \left( \frac{\alpha^3(t)}{8} + \frac{\alpha^2(t)}{2} - 1 \right) - \frac{1}{5} \sqrt{1-\alpha(t)} \left( \frac{\alpha^2(t)}{4} + \frac{\alpha(t)}{2} - 1 \right) \right] \times \right. \\
& \times \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) + \frac{3}{2} r_0 e^{-W_0/kT} \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right)^2 \frac{Aa}{2\delta\tau} + \\
& + \left[ \frac{1}{3} \sqrt{1-\alpha(t)} \left( 1 + \frac{\alpha(t)}{2} \right) - \frac{1}{5} \sqrt{1-\alpha(t)} \left( 1 + \frac{\alpha(t)}{2} - \frac{\alpha^2(t)}{4} \right) \right] \frac{Aa}{2} \times \\
& \times \left( \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) \delta\tau + r_0 e^{-W_0/kT} \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) \delta\tau + \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) \chi \dot{T} - r_0 e^{-W_0/kT} \times \right. \\
& \times \left. \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) \tau_0 - \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) \tau_0^s - 2r_0 e^{-W_0/kT} \tau_0^s \right) + \\
& + \left[ \frac{1}{3} \sqrt{1-\alpha(t)} \left( 1 + \frac{\alpha(t)}{2} \right) \frac{Aa}{2\delta\tau} \right] \left( \chi \dot{T} - r_0 e^{-W_0/kT} \tau_0 \left( \tau_0^s - \delta\tau \right) - \right. \\
& - \left. \chi T \tau_0^s - \frac{r_0 e^{-W_0/kT}}{2} \left( \left( \tau_0^s \right)^2 - \left( \tau_0 \right)^2 \right) \right) \} H \left( \dot{\sigma}_{33} - \dot{\sigma}_{33}^{np} \left( \delta\tau \right) \right) + \\
& + \left\{ 4Aa \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) + r_0 e^{-W_0/kT} \left( \dot{\sigma}_{33} - \frac{3}{2} \dot{\rho}_{33} \right) \right\} \left[ \frac{\sqrt{1-\alpha(t)}}{3} \left( 1 + \frac{\alpha(t)}{2} \right) - \right. \\
& - \left. \frac{\sqrt{1-\alpha(t)}}{5} \left( 1 + \frac{\alpha(t)}{2} - \frac{\alpha^2(t)}{4} \right) \right] + 2Aa \left( \chi \dot{T} - r_0 e^{-W_0/kT} \tau_0 \right) \left[ \frac{\sqrt{1-\alpha(t)}}{3} \times \right. \\
& \times \left. \left( 1 + \frac{\alpha(t)}{2} \right) \right] H \left( \dot{\sigma}_{33} - \dot{\sigma}_{кр} \right).
\end{aligned}$$

где  $H(arg)$  – здесь и далее функция Хевисайда.

Предел пропорциональности и предел текучести находятся по аналогичным формулам 3 и 4.

Графическое изображение диаграммы деформации в зависимости от величины разброса приведены на рисунке 1. Кривые 2,3,4,5 – кривые напряжения деформация, полученные согласно расчетам по формуле 5 при  $\delta\tau = 0,1; 10; 50$  и  $100$  МПа соответственно.

### Библиографический список:

1. Лихачев В. А., Малинин В. Г. «Структурно-аналитическая теория прочности. Спб, 1993г.
2. Малинин В. Г. Основы структурно-аналитической теории физической мезомеханики материалов. Научные труды I Международного семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева, г. Новгород, 1997г.
3. Малинин В. Г., Малинина Н. А. Структурно-аналитическая модель мезомеханики, учитывающая трансляционно-ротационные методы деформации дислокационного и мартенситного происхождения. Научные труды I Международного семинара «Актуальные проблемы прочности» им. В. А. Лихачева, г. Новгород, 1997г.
4. Малинин В. Г. Структурно-аналитическая теория физической мезомеханики материалов. Вестник Новгородского ун-та, 1997г.

### СЕКЦИЯ 3. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ И ТЕРРИТОРИЙ ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ

УДК 620.193

**Обеспечение защиты от коррозии производственных объектов в нефтегазовой отрасли**

Григорьева Т. А.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация:** проведена систематизация и классификация коррозионно-активных факторов в процессах добычи, подготовки и транспортировки нефти и газа; проведена сравнительная оценка методов защиты от коррозии оборудования и металлоконструкций, эксплуатируемых в нефтегазовой отрасли, с указанием наиболее эффективных и оптимальных способов предупреждения и уменьшения коррозионных процессов.

**Ключевые слова:** коррозия, коррозионно-активные факторы, методы антикоррозионной защиты.

Как известно, коррозия металлов и сплавов является самопроизвольным процессом, заключающимся в их разрушении под действием окружающей среды, в результате окислительно-восстановительных реакций (химических и электрохимических). В общем виде процесс коррозии металла можно представить схемой:

$\text{Me} + \text{окислитель} \rightarrow \text{продукты коррозии (Me}^{n+}, \text{Me}_x\text{O}_y, \text{Me(OH)}_n, \text{соли)}$ .

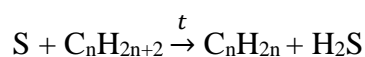
Различные характеристики металла и коррозионной среды, а так же внешние воздействия, влияющие на скорость и вид коррозионного процесса называют факторами коррозии. Факторы, влияющие на вид и распределение коррозии и связанные с природой металла называют внутренними. Сюда относятся такие показатели как термодинамическая устойчивость металла, соотношение компонентов в сплаве, гетерогенность и шероховатость поверхности и т.д.

Факторы, влияющие на вид и распределение коррозии, связанные с составом коррозионной среды (кислотность, наличие растворенных газов и механических примесей и т.д.) и особенностями процесса эксплуатации металлического изделия или сооружения (температура, давление, механические воздействия) называют внешними факторами коррозии. К внешним факторам так же следует относить характер взаимодействия металла с коррозионной средой: полное или не полное погружение, переменное или постоянное, равномерное или не равномерное и т.д.[1,2]

Если говорить об особенностях коррозии металлических конструкций и оборудования в нефтегазовой отрасли, целесообразно выделить две группы факторов коррозии: процессы, обусловленные химическими реакциями между металлом и компонентами среды и физико-химические факторы, обусловленные технологическими параметрами добычи, переработки и транспортировки нефти и газа.

Природный газ и нефть являются носителями коррозионных агентов: вода, кислород, сернистые соединения (элементарная сера, сероводород, меркаптаны, сульфиды и дисульфиды) и кислородсодержащие соединения (оксиды и соли). Негативным фактором также является присутствие хлорид-ионов, которые являются активаторами процесса коррозии [3].

Наличие элементарной серы, которую так же принято называть «активной» опасно тем, что при высоких температурах (свыше 100°C) при реакциях с насыщенными углеводородами происходит дегидрирование, которое сопровождается выделением сероводорода. Получающиеся при этом непредельные соединения вступают во взаимодействие с серой, образуя серосодержащие циклические соединения и далее, под действием окислителей до сульфоксидов:





Меркаптаны RSH в процессах переработки нефти и конденсатов, как и сероводород, кроме коррозии оборудования, отравляют катализаторы. Химические свойства меркаптанов определяются наличием подвижного атома водорода тиогруппы (–SH), а также двух неподвижных пар электронов у атома серы. В щелочной среде кислород вызывает постепенное превращение меркаптанов в соответствующие дисульфиды [4].

Сероводород вызывает коррозию цинка, железа, меди, латуни и алюминия. Элементарная сера мгновенно взаимодействует с медью и ее сплавами, образуя сульфиды, вследствие чего наряду с коррозией металла, приводящей к потере его массы, наблюдается образование отложений на металле. Коррозия металлов меркаптанами определяется их концентрацией в топливе и строением. Ароматические меркаптаны более коррозионно-агрессивны, чем алифатические, при этом бициклические меркаптаны агрессивнее моноциклических.

Вода в нефти может присутствовать в виде простой взвеси, которую легко отделить отстаиванием, или в виде устойчивой эмульсии. В природном газе (газоконденсате) так же содержится вода, которая кроме фактора электрохимической коррозии, негативно влияет на процессы газодобычи, поскольку при высоком давлении образуются соединения воды с природным газом в виде твердых газовых гидратов.

Наличие (размер и количество) механически примесей так же является важным коррозионным фактором. Оказывая истирающее воздействие на металл твердые частицы, взвешенные в водо-нефтяной эмульсии или парогазовой смеси, влияют на состояние внутренних стенок и металлических конструкций приводя к образованию вмятин, потертостей, царапин, и т. д.

К внешним факторам, связанным с условиями хранения и транспортировки нефти, нефтепродуктов и газа относятся: температура сырья и окружающей среды, скорость потока, давние и ряд других. Кроме того, интенсивность коррозионных разрушений металлоконструкций обусловлена не только технологическим назначением и технологическими факторами их эксплуатации, но и конструктивными (часто неудачными) особенностями устройства их отдельных узлов. Это приводит к резко выраженному неравномерному распределению коррозии и к более быстрому выходу их из строя.

Принимая во внимание широкий спектр факторов, влияющих на коррозию оборудования и конструкций в нефтегазовой отрасли, обеспечение защиты от коррозии представляет собой ряд мероприятий, реализующихся на разных стадиях проектирования, разработки и эксплуатации производственного объекта.

1. На стадии проектирования необходимо выполнение изысканий в части физико-химического анализа грунта грунтовых вод (определение кислотности, активных окислителей, общей минерализации и т.д.), измерения глубины грунтовых вод и глубины промерзания грунта; определения наличия блуждающих токов; оценки возможного влияния линий электропередач и т.д.

2. При выборе материала исполнения конструкций и трубопроводов необходимо анализировать состав и особенности сплава, или рассматривать альтернативные варианты исполнения изделий. К таким перспективным материалам относятся стекло- базальто-, углепластики, обладающие теплопроводностью дерева, прочностью и долговечностью стали, биологической стойкостью, влагостойкостью и атмосферостойкостью полимера. Легковесные, прочные и предназначенные для длительной эксплуатации конструкции и трубопроводы, исполненные из композиционных материалов, имеют один существенный недостаток – достаточно высокую стоимость.

3. При использовании стальных металлоконструкций, необходимо обеспечивать защиту эксплуатируемых сооружений нанесением защитных покрытий. В настоящее время, на рынке представлен широкий спектр антикоррозионных покрытий на разных основах, которые можно подобрать в зависимости от характеристик защищаемого объекта и необходимой степени защиты.



Если рассматривать неметаллические покрытия, то здесь следует выделить следующие группы:

а) неорганические покрытия: искусственные пленки с высоким защитным эффектом, образующиеся на поверхности металла., в результате процессов оксидирования, фосфатирования и т.д. Такие покрытия хорошо защищают от атмосферной коррозии и служат отличным грунтом для нанесения лакокрасочных покрытий.

б) лакокрасочные покрытия, к которым относятся лаки (коллоидные растворы высыхающих масел) и краски (суспензии минеральных пигментов в органическом связующем).

Лакокрасочные покрытия (ЛКП) – это самый распространенный метод защиты. При достаточно большом ряде преимуществ, таких как: относительно не высокая стоимость и простота нанесения; легкость сочетаемости с другими методами защиты; декоративность, ЛКП имеют и недостатки: невысокую термостойкость и механическую прочность; малую стойкость в воде.

При нанесении на изделие ЛКП защищают металл от коррозии, выполняя следующие функции:

- механическая изоляция металла от внешней среды;
- ингибирующие действие пигмента;
- электроизолирующие свойства.

в) смолы и пластмассы. Покрытия смолами и пластмассами обладают наиболее высокими защитными свойствами в различных агрессивных средах (в том числе в воде, щелочах, кислотах. Чаще всего используются фенолформальдегидные, эпоксидные, кремнийорганические смолы, асфальтобитумные покрытия. Эпоксидные смолы стойки к щелочам, ряду растворителей. У них хорошая адгезия к металлам и высокая стойкость к термическим и механическим воздействиям. Кремнийорганические смолы термостойкие, водоотталкивающие, хорошие диэлектрики. Пластмассовые покрытия (особенно фторопласт) используют для футеровки стальной аппаратуры. Применяют винипласт, полиизобутилен, полиэтилен и др.

г) эмали. Эмали представляют собой стекловидную массу, которую получают сплавлением шихты (песок, мел, глина, полевой шпат) и плавней (бура, сода, поташ и др.). Кроме этого вводят окислы хрома, титана, цинка – они повышают жаростойкость, дают нужную окраску. Эмали стойки к химическому и температурному воздействию до 1100°C, а иногда до 1400°C.

4. Выполнять обработку коррозионной среды. Практика борьбы с коррозией, асфальтосмолопарафиновыми отложениями, выпадениями солей и появлением механических примесей показывает, что наиболее эффективным способом удаления накоплений является ингибирование и подбор необходимого реагента.

Существует несколько классификаций ингибиторов коррозии: по типу среды (для нейтральных, кислых или щелочных сред, сероводородных, нефтяных и т.д); по механизму действия (пассивирующие и адсорбционные); по характеру защитного (анодные, катодные, смешанные).

Еще один вариант классификации ингибиторов коррозии по химической природе на летучие, органические, неорганические. Неорганические ингибиторы коррозии используются чаще всего. К ним относятся некоторые пассиваторы, катодные, анодные, пленкообразующие ингибиторы и т.д. Ингибирующий эффект таких соединений можно объяснить их составом. Некоторые анионы (например фосфат –ионы и нитрит-ионы) а также катионы ( $Ni^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $As^{3+}$ ) способствуют уменьшению скорости коррозионного процесса.

Органические ингибиторы коррозии считаются веществами смешанного действия. Они замедляют катодную и анодную реакции. Защитный эффект органических ингибиторов зависит от их концентрации, температуры, природы соединений. Чаще всего в состав органических ингибиторов входит кислород, азот, сера. Они адсорбируются исключительно на поверхности металла. К органическим ингибиторам относятся некоторые летучие, амины, органические кислоты и их соли, меркаптаны (тиолы) и др [5].

5. Предусмотреть варианты обеспечения электрохимической защиты трубопроводов, заключающейся в поляризации материала металлических труб, при помощи которой с поверхности металла устраняются возникающие короткие замыкания.

#### **Библиографический список:**

1. Авдеенко А.П., Поляков А.Е. Коррозия и защита металлов: Краткий курс лекций. – Краматорск: ДГМА, 2003. – 104 с.
2. Система защиты от коррозии оборудования переработки нефти/Бурлов В. В., Алцыбеева А. И., Кузинова Т. М. – СПб. : ЦОП «Профессия», 2015. – 336.
3. Дремичева Е.С., Зверева Э.Р., Изучение коррозионных процессов нефтяного оборудования // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2018. №1-2.
4. Сернистые соединения углеводородного сырья / А.М. Мазгаров, О.М. Корнетова. – Казань: Казан. ун-т, 2015. – 36 с.
5. Засовская, М. А. Электрохимия в нефтегазовом вузе : учебное пособие / М. А. Засовская, Т. А. Григорьева. – Ухта : Изд-во Ухтинского государственного технического университета, 2023. – 108 с.

УДК 544.18:[553.982.2+553.981.2]

#### **Квантово-химическое моделирование процессов взаимодействия загрязняющих веществ с парами воды на нефтяных и газовых месторождениях**

Старинец М. В.<sup>1</sup>, Засовская М. А.<sup>2</sup>

*1 - ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» НШПП «Яреганефть», пгт. Ярега, Россия*

*2 - Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В данной работе рассмотрен экологический вопрос утечек в атмосферу опасных для окружающей среды веществ. Выделена проблема, обуславливающая выбор реакций, описанных ниже, и показана её актуальность. Рассмотрены реакции с вредными веществами, выбрасываемыми промышленностью в атмосферу, такими как: оксиды азота (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), оксид серы (SO<sub>2</sub>), формальдегид (CH<sub>2</sub>O) с комплексами, кластерами воды в атмосфере. С помощью квантово-химического метода B3LYP/6-311++G(2d,2p) получены термодинамические параметры. Путём обработки результатов термодинамических параметров дана оценка вероятности реакций при утечке вредных веществ в атмосферу. Было установлено, что реакции образования кластеров NO<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, NO(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> термодинамически выгодные процессы.

**Ключевые слова:** вредные вещества, оксиды азота, оксид серы, формальдегид, загрязнение атмосферы.

Оксид серы, оксид углерода, оксиды азота, предельные и ароматические углеводороды, углерод (сажа) – эти вредные вещества в больших количествах выбрасываются в атмосферу на нефтяных и газовых месторождениях. Эти вредные вещества весьма токсичны. До 30% загрязняющих веществ (оксиды азота (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O<sub>4</sub>), оксид серы (SO<sub>2</sub>), формальдегид (CH<sub>2</sub>O)), которые выбрасываются промышленностью, даёт нефтегазовый комплекс [1, с.54].

Цель работы:

- установить термодинамические параметры реакций основных загрязняющих веществ в газовой фазе;
- оценить вероятности образования комплексов и кластеров данных веществ с молекулами воды;
- рассмотреть возможность образования комплексов и кластеров при различных температурных условиях.

В свободном состоянии оксиды азота (NO, NO<sub>2</sub>) представлены в виде димеров, это обусловлено наличием не спаренного электрона. Нами были рассмотрены реакции в виде устойчивого свободного радикала и в виде димеров. К молекуле NO происходит присоединение по неспаренному электрону, не к NO, а к димеру ONNO, поэтому уменьшается скорость присоединения

с повышением температуры – димер разваливается на половинки. Теперь уже у кислорода появился неспаренный электрон – молекула оксида азота (IV) тоже свободный радикал [2, с.7].

Предполагая, что в газовой фазе в реакцию вступают n-ное количество молекул воды в виде кластеров  $(\text{H}_2\text{O})_n$  и в виде нескольких молекул. Протекающие в газовой фазе реакции на нефтяных и газовых месторождениях можно описать следующими схемами:



Где  $\text{M} = \text{N}_2\text{O}_2, \text{N}_2\text{O}_4, \text{NO}, \text{NO}_2, \text{SO}_2$  и  $\text{CH}_2\text{O}$ ,  $n=1-3$ .

В реакционной смеси концентрация нейтральных, заряженных кластеров, комплексов в реакционной смеси оказывает влияние на скорость и механизм гидролиза. Для оценки вероятности реакций с участием этих частиц рассчитаны термодинамические параметры образования нейтральных комплексов, кластеров воды, оксидов азота в виде димеров  $\text{N}_2\text{O}_2, \text{N}_2\text{O}_4$ , в виде свободных устойчивых радикалов  $\text{NO}, \text{NO}_2, \text{SO}_2, \text{CH}_2\text{O}$ . Для достижения цели проведена полная оптимизация геометрии с последующим расчетом колебательных частот для всех изученных молекулярных структур, переходных состояний, а также рассчитаны термодинамические функции для оптимизированных структур.

Молекулярная геометрия всех комплексов, кластеров оптимизирована с помощью метода функционала плотности. Расчеты проводились с помощью программ Gaussian09. Термодинамические параметры наиболее вероятных реакций образования этих кластеров приведены в таблицах 1-2. Образование одного моля вещества из входящих в него элементов в их стандартных состояниях сопровождается изменением свободной энергии, которое показывает энергия образования  $\Delta_r E$ . Знак  $\Delta_r E$  показывает возможность осуществления реакции в условиях, для которых проводились вычисления. С помощью  $\Delta_r G$  показано, что для более глубокого анализа необходимо раздельное рассмотрение энергетического, энтропийного факторов. Все процессы образования кластеров  $\text{NO}_2(\text{H}_2\text{O})_n, \text{NO}(\text{H}_2\text{O})_n$ , характеризуются отрицательной свободной энергией Гиббса, отрицательными энергиями образования, как из мономеров, так и из кластеров. Положительными значениями  $\Delta_r G, \Delta_r E$  характеризуются все процессы образования кластеров  $\text{N}_2\text{O}_2(\text{H}_2\text{O})_n$ . Для процессов образования кластеров  $\text{N}_2\text{O}_4(\text{H}_2\text{O})_n$  характерны положительная свободная энергия Гиббса, отрицательные энергии образования. Реакции образования кластеров  $\text{NO}(\text{H}_2\text{O})_n, \text{N}_2\text{O}_2(\text{H}_2\text{O})_n, \text{N}_2\text{O}_4(\text{H}_2\text{O})_n$ , описываемая схемой (1), характерны большие значения  $\Delta_r G$ , чем образование комплексов из кластеров воды. Всем процессам образования кластеров  $\text{НСОН}(\text{H}_2\text{O})_n$  характерны отрицательные энергии образования и положительная свободная энергия Гиббса. Положительные значения  $\Delta_r G, \Delta_r E$  характерны для всех процессов образования кластеров  $\text{SO}_2(\text{H}_2\text{O})_n$ , при этом реакции образования кластеров, протекающие по схеме (1), характеризуются меньшими значениями  $\Delta_r G$ , чем реакции образование кластеров, согласно схеме (2) [3, с.12].

Таблица 1 - Рассчитанные термодинамические характеристики ( $\text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$ ) реакций образования нейтральных кластеров воды  $\text{NO}_2(\text{H}_2\text{O})_n, \text{NO}(\text{H}_2\text{O})_n, \text{N}_2\text{O}_2(\text{H}_2\text{O})_n, \text{N}_2\text{O}_4(\text{H}_2\text{O})_n, n=1-3$ .

Реакция	B3LYP/6-311++G(2d,2p)			
	$\Delta_r E,$	$\Delta_r H,$	$\Delta_r G,$	$\Delta S$
$\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^* \cdot \text{H}_2\text{O}$	-83,41	-83,49	-51,78	-0,11
$\text{NO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^* (\text{H}_2\text{O})_2$	-568,49	-571,31	-503,36	-0,22
$\text{NO}_2 + (\text{H}_2\text{O})_2 \rightarrow \text{NO}_2^* (\text{H}_2\text{O})_2$	-556,79	-557,48	-504,98	-0,18
$\text{NO}_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}_2^* (\text{H}_2\text{O})_3$	-620,56	-625,06	-521,34	-0,33
$\text{NO}_2 + (\text{H}_2\text{O})_3 \rightarrow \text{NO}_2^* (\text{H}_2\text{O})_3$	-579,76	-576,41	-542,48	-0,12
$\text{NO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}^* \cdot \text{H}_2\text{O}$	-89,45	-94,05	-51,55	-0,12
$\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}^* (\text{H}_2\text{O})_2$	-162,18	-170,55	-91,81	-0,24
$\text{NO} + (\text{H}_2\text{O})_2 \rightarrow \text{NO}^* (\text{H}_2\text{O})_2$	-150,52	-156,75	-103,84	-0,18
$\text{NO} + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NO}^* (\text{H}_2\text{O})_3$	-216,55	-228,09	-104,33	-0,38
$\text{NO} + (\text{H}_2\text{O})_3 \rightarrow \text{NO}^* (\text{H}_2\text{O})_3$	-175,76	-179,44	-125,47	-0,16

Продолжение Таблицы 1

$N_2O_2+H_2O \rightarrow N_2O_2^*H_2O$	269,18	268,48	296,06	-0,09
$N_2O_2+2H_2O \rightarrow N_2O_2^*(H_2O)_2$	160,79	157,46	211,56	-0,15
$N_2O_2+(H_2O)_2 \rightarrow N_2O_2^*(H_2O)_2$	172,47	171,26	199,52	-0,08
$N_2O_2+3H_2O \rightarrow N_2O_2^*(H_2O)_3$	130,19	123,29	216,92	-0,28
$N_2O_2+(H_2O)_3 \rightarrow N_2O_2^*(H_2O)_3$	170,99	171,94	195,78	-0,08
$N_2O_4+H_2O \rightarrow N_2O_4^*H_2O$	-10,34	-9,05	23,78	-0,09
$N_2O_4+2H_2O \rightarrow N_2O_4^*(H_2O)_2$	-28,68	-30,67	42,28	-0,24
$N_2O_4+(H_2O)_2 \rightarrow N_2O_4^*(H_2O)_2$	-17,02	-16,87	30,24	-0,16
$N_2O_4+3H_2O \rightarrow N_2O_4^*(H_2O)_3$	-55,04	-59,88	52,75	-0,34
$N_2O_4+(H_2O)_3 \rightarrow N_2O_4^*(H_2O)_3$	-14,24	-11,24	31,61	-0,15

Таблица 2 - Рассчитанные термодинамические характеристики (кДж·моль<sup>-1</sup>) реакций образования нейтральных кластеров воды  $HCON(H_2O)_n$ ,  $SO_2(H_2O)_n$ ,  $n=1-3$ .

Реакция	B3LYP/6-311++G(2d,2p)			
	$\Delta_r E$ ,	$\Delta_r H$ ,	$\Delta_r G$ ,	$\Delta S$
$HCON+H_2O \rightarrow HCON^*H_2O$	-11,35	-12,28	14,81	-0,07
$HCON+2H_2O \rightarrow HCON^*(H_2O)_2$	-34,83	-39,33	31,16	-0,65
$HCON+(H_2O)_2 \rightarrow HCON^*(H_2O)_2$	-23,15	-25,55	19,15	-0,57
$HCON+3H_2O \rightarrow HCON^*(H_2O)_3$	-61,67	-68,55	40,75	-0,33
$HCON+(H_2O)_3 \rightarrow HCON^*(H_2O)_3$	-20,88	-19,88	19,63	-0,11
$SO_2+H_2O \rightarrow SO_2^*H_2O$	418,11	417,23	453,46	-0,10
$SO_2+2H_2O \rightarrow SO_2^*(H_2O)_2$	394,88	390,15	465,34	-0,25
$SO_2+(H_2O)_2 \rightarrow SO_2^*(H_2O)_2$	406,56	403,90	453,28	-0,15
$SO_2+3H_2O \rightarrow SO_2^*(H_2O)_3$	364,57	356,93	471,66	-0,35
$SO_2+(H_2O)_3 \rightarrow SO_2^*(H_2O)_3$	405,37	405,55	450,52	-0,13

В таблице 3 представлены данные значений энергии Гиббса для различных температур. Учитывая протяжённость нашей страны, её термический режим в различные времена года, были выбраны температуры с шагом 30°C от -30°C до 30°C.

Таблица 3 – Значения энергий Гиббса для реакций образования нейтральных кластеров воды  $NO_2(H_2O)_n$ ,  $NO(H_2O)_n$ ,  $N_2O_2(H_2O)_n$ ,  $N_2O_4(H_2O)_n$ ,  $HCON(H_2O)_n$ ,  $SO_2(H_2O)_n$ .

Реакция	-30	0	+30
$NO_2+H_2O \rightarrow NO_2^*H_2O$	-57,17	-54,23	-51,31
$NO_2+2H_2O \rightarrow NO_2^*(H_2O)_2$	-514,96	-508,64	-502,28
$NO_2+(H_2O)_2 \rightarrow NO_2^*(H_2O)_2$	-514,20	-509,17	-504,13
$NO_2+3H_2O \rightarrow NO_2^*(H_2O)_3$	-539,09	-529,41	-519,72
$NO_2+(H_2O)_3 \rightarrow NO_2^*(H_2O)_3$	-548,27	-545,11	-541,93
$NO+H_2O \rightarrow NO^*H_2O$	-58,94	-54,91	-50,86
$NO+2H_2O \rightarrow NO^*(H_2O)_2$	-105,41	-97,98	-90,55
$NO+(H_2O)_2 \rightarrow NO^*(H_2O)_2$	-113,13	-108,06	-102,98
$NO+3H_2O \rightarrow NO^*(H_2O)_3$	-125,78	-114,08	-102,36
$NO+(H_2O)_3 \rightarrow NO^*(H_2O)_3$	-134,97	-129,78	-124,60
$N_2O_2+H_2O \rightarrow N_2O_2^*H_2O$	291,42	293,95	296,47

Продолжение таблицы 3

$\text{N}_2\text{O}_2+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{N}_2\text{O}_2^*(\text{H}_2\text{O})_2$	202,48	207,42	212,37
$\text{N}_2\text{O}_2+(\text{H}_2\text{O})_2\rightarrow\text{N}_2\text{O}_2^*(\text{H}_2\text{O})_2$	194,75	197,35	199,94
$\text{N}_2\text{O}_2+3\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{N}_2\text{O}_2^*(\text{H}_2\text{O})_3$	201,00	209,68	218,36
$\text{N}_2\text{O}_2+(\text{H}_2\text{O})_3\rightarrow\text{N}_2\text{O}_2^*(\text{H}_2\text{O})_3$	191,83	193,98	196,13
$\text{N}_2\text{O}_4+\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{N}_2\text{O}_4^*\text{H}_2\text{O}$	18,19	21,25	24,30
$\text{N}_2\text{O}_4+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{N}_2\text{O}_4^*(\text{H}_2\text{O})_2$	29,72	36,57	43,41
$\text{N}_2\text{O}_4+(\text{H}_2\text{O})_2\rightarrow\text{N}_2\text{O}_4^*(\text{H}_2\text{O})_2$	21,99	26,49	30,98
$\text{N}_2\text{O}_4+3\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{N}_2\text{O}_4^*(\text{H}_2\text{O})_3$	33,33	43,92	54,51
$\text{N}_2\text{O}_4+(\text{H}_2\text{O})_3\rightarrow\text{N}_2\text{O}_4^*(\text{H}_2\text{O})_3$	24,16	28,22	32,28
$\text{HCOH}+\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{HCOH}^*\text{H}_2\text{O}$	10,26	12,74	15,21
$\text{HCOH}+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{HCOH}^*(\text{H}_2\text{O})_2$	-4,93	14,76	34,46
$\text{HCOH}+(\text{H}_2\text{O})_2\rightarrow\text{HCOH}^*(\text{H}_2\text{O})_2$	-12,66	4,68	22,03
$\text{HCOH}+3\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{HCOH}^*(\text{H}_2\text{O})_3$	21,96	32,21	42,47
$\text{HCOH}+(\text{H}_2\text{O})_3\rightarrow\text{HCOH}^*(\text{H}_2\text{O})_3$	12,78	16,51	20,24
$\text{SO}_2+\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{SO}_2^*\text{H}_2\text{O}$	447,23	450,63	454,03
$\text{SO}_2+2\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{SO}_2^*(\text{H}_2\text{O})_2$	452,36	459,43	466,50
$\text{SO}_2+(\text{H}_2\text{O})_2\rightarrow\text{SO}_2^*(\text{H}_2\text{O})_2$	444,64	449,35	454,07
$\text{SO}_2+3\text{H}_2\text{O}\rightarrow\text{SO}_2^*(\text{H}_2\text{O})_3$	451,84	462,64	473,44
$\text{SO}_2+(\text{H}_2\text{O})_3\rightarrow\text{SO}_2^*(\text{H}_2\text{O})_3$	442,66	446,94	451,22

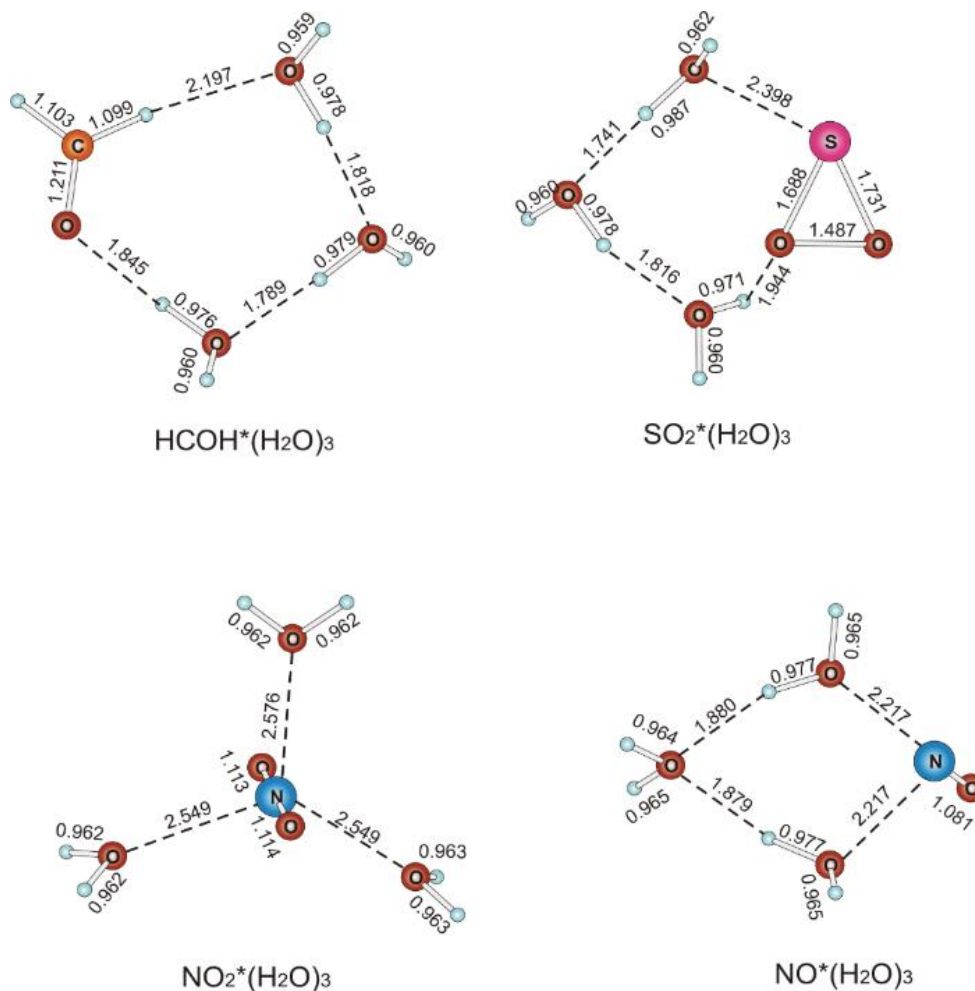


Рисунок 1 – Структуры комплексов HCOH(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, SO<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, NO<sub>2</sub>(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>, NO(H<sub>2</sub>O)<sub>n</sub>

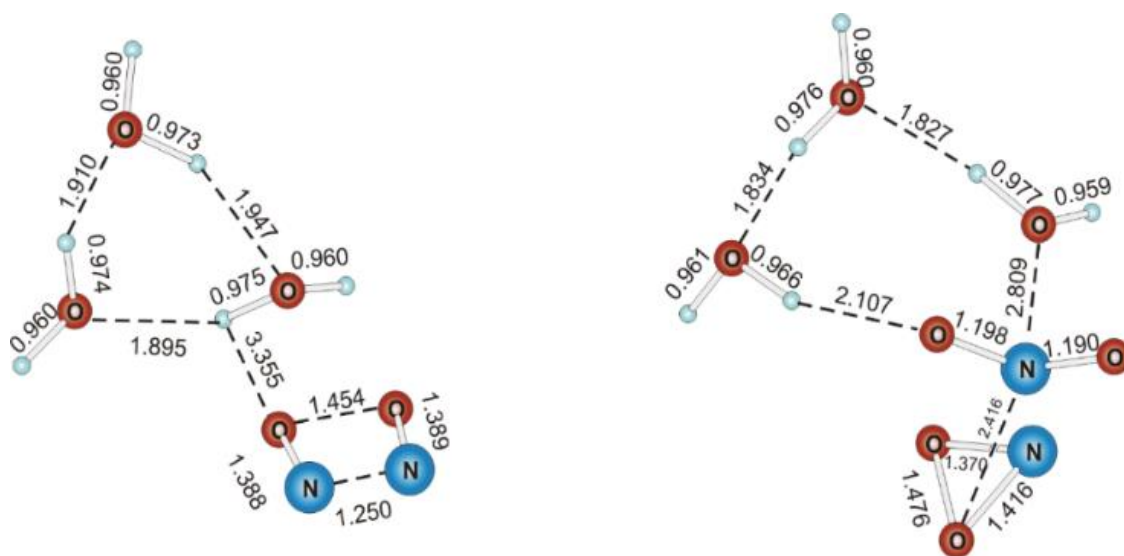


Рисунок 2 – Структуры комплексов  $N_2O_2(H_2O)_n$ ,  $N_2O_4(H_2O)_n$

В условиях крайнего севера, что в условиях умеренного климата реакции идут по тем же принципам, что описаны выше. С увеличением температуры для всех реакций наблюдается постепенное увеличение энергии Гиббса, значения которой сильно не изменяются при различных температурах.

Оптимизированные структуры кластеров  $HCOH(H_2O)_n$ ,  $SO_2(H_2O)_n$ ,  $NO_2(H_2O)_n$ ,  $NO(H_2O)_n$  представлены на рисунке 1, оптимизированные структуры кластеров  $N_2O_2(H_2O)_n$ ,  $N_2O_4(H_2O)_n$  – на рисунке 2. С  $HCOH$ ,  $SO_2$ ,  $NO$  образуются циклические комплексы, с остальными соединениями – ациклические.

В данной статье были представлены результаты квантово – химического моделирования процессов, происходящих при добыче нефти и газа, связанного с ней. В ходе расчётов было выяснено, что для кластеров  $NO_2(H_2O)_n$ ,  $NO(H_2O)_n$  характерна большая вероятность их образования. В дальнейшем реакции газофазного гидролиза пойдут через образование диммеров, триммеров. Образование этих кластеров является термодинамически выгодным процессом, происходящим при нормальных условиях.

#### Библиографический список:

1. Бузмаков, С.А. Техногенные изменения компонентов природной среды в нефтедобывающих районах Пермской области / С.А. Бузмаков, С.М. Костарев. -Пермь, 2003. 171 с.
2. S.K. Ignatov, Moltran v.2.5 - Program for molecular visualization and thermodynamic calculations, 2004, <http://www.unn.ru/chem/moltran>: University of Nizhny Novgorod.
3. L. A. Curtiss, P.C. Redfern, K. Raghavachari, Gaussian-4 theory.// J. Chem. Phys., 2007. 126: p. 84 - 108.

УДК 622.279.5:542.934

#### Газогидраты и методы борьбы с ними при эксплуатации газовых скважин

Старинец М. В.<sup>1</sup>, Засовская М. А.<sup>2</sup>

*1 - ООО «ЛУКОЙЛ-Коми» НШПП «Яреганефть», пгт. Ярега, Россия*

*2 - Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Проблема образования гидратов стоит достаточно остро при разработке месторождений Западной Сибири, Крайнего Севера, потому что при малой температуре на добываемый природный газ, который насыщен водой, оказывает влияние высокое давление. Ствол скважины, установки подготовки газа, газораспределительные станции подвержены образованию газовых гидратов. Существует необходимость контролировать внутренние параметры газожидкостной смеси (давление, плотность природного газа, температуру, влагосодержание, компонентный состав), чтобы своевременно предупредить

гидратообразование, обнаружить зоны формирования газогидратов.

Для борьбы с возникающими осложнениями в сфере добычи газа широко распространены ингибиторы гидратообразования. Для ингибирования в большинстве случаев применяют метанол в силу его высокой эффективности, а также с точки зрения экономической выгоды.

**Ключевые слова:** природный газ, скважина, газогидраты, ингибитор, метанол.

Гидраты – это твердые соединения, в которых молекулы газа заполняют структурные пустоты кристаллической решетки, образованной молекулами воды с помощью прочной водородной связи. Причины образования газогидратов: турбулентные потоки, сильное охлаждение, наличие в газе частиц твердых веществ, попадание воды в трубы. Газогидраты могут вызвать остановку системы транспорта газа (выход из строя промыслового оборудования, закупорка труб). Значительная часть материальных затрат от себестоимости добычи углеводородов на месторождениях России отводится на предупреждение, борьбу с отложениями газогидратов.

Факторы, ускоряющие процесс образование газового гидрата:

- высокая скорость потока в газопроводах;
- в потоке молекулы природного газа в магистральных трубопроводах, теплообменниках, резервуарах находятся в хаотичном движении, непрерывно перемешиваясь, это приводит к увеличению интенсивности образования газогидратов;
- гидратообразование происходит интенсивно в областях, благоприятных для фазового перехода из жидкого в твердое соединение, к которым относят соединительные элементы (колена, тройники, фланцы), нарушения строения трубопровода (сварной шов), запорная арматура (клапана, задвижки);
- на процесс формирование газового гидрата оказывает действие наличие воды, а также благоприятным центром кристаллизации является поверхность раздела газ-вода.

Газогидратные системы являются продолжением традиционной углеводородной системы, но гораздо более тесно связаны с биогенными газовыми системами. Температуры, при которых образуется большая часть биогенного газа, в основном ниже базового уровня стабильности газового гидрата, что означает, что большая часть биогенного газа должна мигрировать в зону стабильности гидрата газа и должна находиться на уровнях, превышающих растворимость для образования гидратов газа. Газовые гидраты считались «самоуплотняющимися», но данные, полученные из кернов под давлением и лабораторных экспериментов, показывают, что для залежей газовых гидратов могут потребоваться местные уплотнения [1, с. 183].

Природные газогидраты являются основным неиспользованным ресурсом природного газа на планете. Из-за огромного размера потенциального ресурса финансируемые правительством исследовательские программы, в основном ведущиеся Японией, Индией, Китаем, Кореей, работают над подтверждением ресурса гидрата газа и разработкой технологии разведки и добычи. Недавние испытания морской добычи в Японии и Китае, наземные испытания на Аляске помогают доказать техническую осуществимость ресурса газогидрата.

Благодаря свойствам газогидратов их можно рассмотреть, как твердые растворы. Содержание в газообразной фазе водяного пара в системе газ — гидрат меньше, чем в системе газ — вода содержание в газообразной фазе водяного пара больше, чем в системе газ – гидрат (данные из исследований Гаммершмидта). Каждый газовый гидрат имеет постоянную для него характерную парциальную упругость водяного пара, которая меньше упругости пара над жидкой водой при той же температуре. Они распадаются после того, как упругость паров воды будет ниже парциальной упругости паров исследуемого гидрата. Появление гидратов в трубопроводе показано на рисунке 1.

Формирование пробки начинается на стенке трубы, поскольку теплообмен направлен радиально наружу. На границе раздела между водой и газом находится начало образования гидрата на стенке трубы. Режим потока изменяется от стратифицированного потока воды и газа в направлении прерывистого потока. Вода подается в верхнюю часть трубы. Весь периметр стены покрыт гидратами, и достигается закрытый гидратный слой. Гидратный слой растёт в

радиальном направлении к центру трубы. При определенных объемных расходах, тепловых потоках растущий гидратный слой приводит к закупориванию трубопровода. В состав газогидратов входит вода и следующие молекулы: метана, этана, пропана, нормального бутана, изобутана, азота, диоксида углерода, сероводорода. Гидраты приводят к блокировке линии электропередачи, предотвращению выбросов пробок, ставят под угрозу фундаменты глубоководных платформ и трубопроводов, вызывают обрушение труб и обсадных колонн, а также теплообменники, клапаны и расширители грязного технологического процесса [2, с. 246].

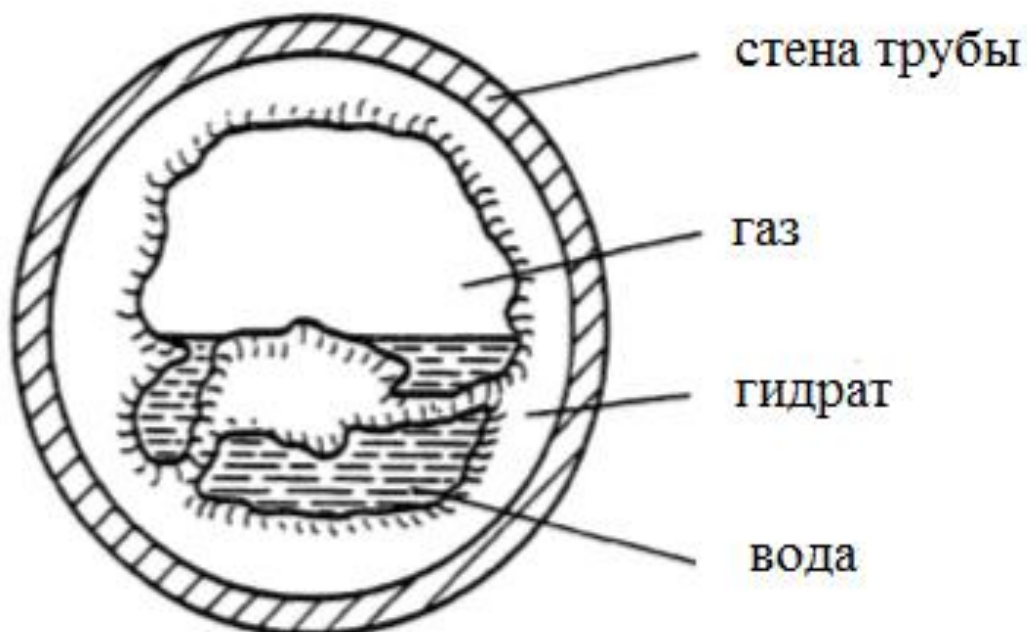


Рисунок 1 - Схема образования в трубе гидрата

В результате рентгенографических исследований Штакельберга, Мюллера и Джонсона было обнаружено, что кристаллогидраты являются клеточными соединениями с двумя структурами, которые обладают кубической симметрией: структурой I, которая образуется парами, газами, представленной на рисунке 2, структурой II, которая образуется жидкостями, представленной на рисунке 3. Пары пропана образуют гидрат со структурой II, что является исключением.

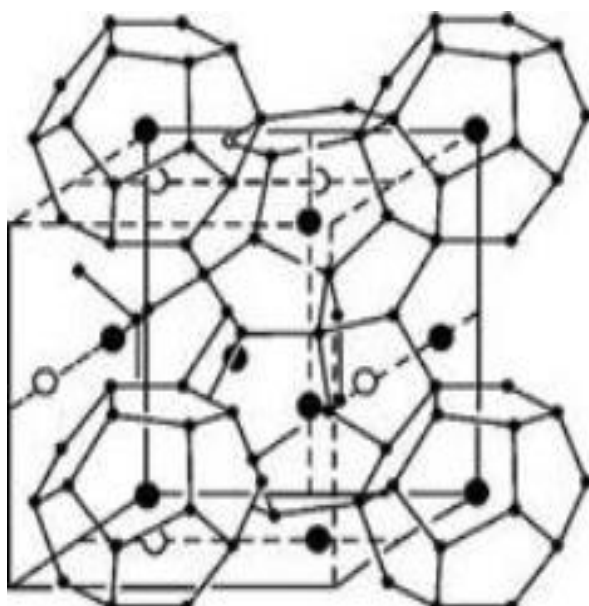


Рисунок 2 - Структура I газового гидрата



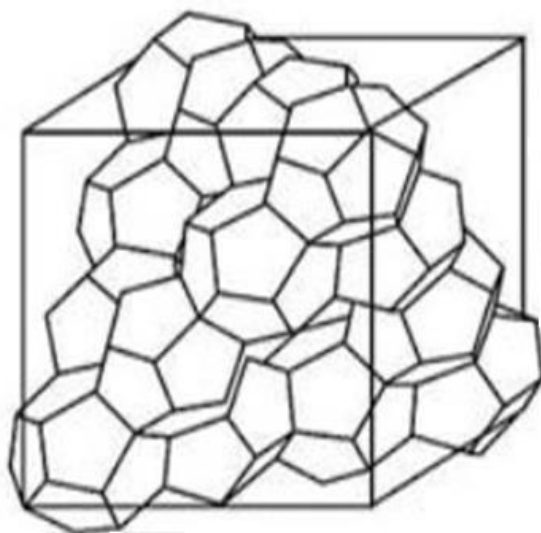


Рисунок 3 - Структура II жидкого гидрата

Благодаря своим свойствам водородной связи молекулы воды способны образовывать полости, вмещающие молекулы с низким молекулярным весом. Включение этих молекул газа стабилизирует структуру метастабильной структуры воды. Существует два различных типа общей гидратной структуры, которые упоминаются как структура I и структура II. Обе структуры содержат множество маленьких и больших полостей. Только молекулы небольшого размера, соответствующей геометрии способны проникать в полости. Физико-химические характеристики газогидратов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Физико-химические характеристики гидратов.

Гидратообразователь	Критическая температура кристаллообразователя, °C	Абсолютное давление диссоциации при 0°C, МПа	Температура разложения гидрата при давлении 0,1 МПа, °C	Критическая точка разложения гидрата, °C
Структура I				
CH <sub>4</sub>	-190,00	10,50	-42,80	-
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	-93,00	0,52	-15,80	+14,50
CO <sub>2</sub>	-79,00	1,23	-24,00	+18,00
H <sub>2</sub> S	-60,00	0,09	+0,35	+29,50
Структура II				
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	-45,00	0,10	+8,50	-
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O	-24,00	-	-	-
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Cl	+13,00	0,026	+4,80	+0,78
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> Br	+38,00	0,020	+14,00	+0,22
CHCl <sub>3</sub>	+61,00	0,066	+1,60	+0,08

Бороться с образованием газовых гидратов можно безингибиторным и ингибиторным способами. Первый способ состоит в том, чтобы уменьшить давление, увеличить температуру. Снижение давления в газопроводе ниже равновесного давления образования гидратов при сохранении температуры служит для предупреждения образования газовых гидратов. Этот метод применяется в аварийных случаях для разложения гидратов в газопроводе в сочетании с ингибиторами, так как в противном случае после повышения давления гидраты появляются вновь. Метод подогрева газа заключается в том, что при сохранении давления в газопроводе температура газа поддерживается выше равновесной температуры образования гидратов. Он применяется на газораспределительных станциях, где при больших перепадах давления

вследствие дроссельного эффекта температура газа может значительно уменьшиться, в результате чего обмерзают краны, редуцирующие клапаны, диафрагмы.

В Российской Федерации ингибиторный способ лежит в основе всех способов предупреждения, борьбы с образованием гидратов. Основной способ борьбы с газовыми гидратами в трубопроводах – последовательная осушка газа, для этого используют такие ингибиторы, как солевые соединения, спирты. Метанол – антигидратный реагент, используемый для предупреждения образования газовых гидратов, ликвидации возникающих гидратных отложений. Он используется на Оренбургском, Карачаганакском, Астраханском газоконденсатных месторождениях, в составе природного газа, которых присутствует сероводород, диоксид углерода, на большинстве подземных хранилищ газа, газораспределительных станциях, шельфовых газоконденсатных месторождениях [3, с. 135].

Большая часть углеводородной промышленности рассматривает гидраты как неприятность при бурении, добыче, переработке, которая может быть устранена путем использования большого количества ингибиторов, таких как метанол, глицерин. Тем не менее, с прогнозами больших глубоководных запасов, мы достигнем точки экономической нестабильности для такого впрыска ингибитора. Существует необходимость исследовать альтернативные схемы ингибирования гидратов.

### **Библиографический список:**

1. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. – М. : Химия, 1980.-296 с.
2. Запорожец, Е.П. Гидраты: монография / Е.П. Запорожец, Н.А. Шостак. – Краснодар: Издательский Дом – Юг, 2014. – 460 с.
3. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов. – М.: Недра, 1974.-208 с.

УДК 622.276.65

### **Исследование источников тепловыделений, формирующий нагревающий микроклимат в уклонных блоках нефтешахт**

Грунковой Т. В., Белкин И. А.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В работе представлен обзор источников тепловыделений в рудничную атмосферу нефтешахт. Определены места прорыва пара в полевых штреках при термошахтной добычи нефти. Проведенное исследование источников тепловыделений, формирующий нагревающий микроклимат позволил определить, что основной вклад вносят прорывы пара, по причинам трещиноватости горного массива и перегрева продуктивного пласта.

**Ключевые слова:** нефтешахта, термошахтная добыча, нагревающий микроклимат.

Для исследования источников тепловыделений, формирующий нагревающий микроклимат в уклонных блоках нефтешахт проведены замеры в горных выработках по параметрам: температура горного массива, температура горной выработки и влажности. Измерения производились приборами: пирометром и термометром. Результаты замеров приведены в таблице 1.

Результаты замеров температур горного массива и горной выработки уклонного блока 1Т-4 представлены на рисунке 1.

По результатам исследований источников тепловыделений, формирующий нагревающий микроклимат в уклонных блоках нефтешахт был сделан следующий вывод, что повышенные значения температура воздуха в горных выработках не зависят от расстояния удаления от вентиляционного ствола или вентиляционный скважины. Ярким примером (рисунок 2) является вентиляционная скважина, расположенная рядом с буровой галереей вентиляционного штрека панели 1Т-6, где были зарегистрированы максимальные температуры горного массива и воздуха горной выработки в точках № 42, 43.

С целью выявления причин, влияющих на формирование температуры воздуха в уклонном блоке 1Т-4 нефтешахты № 1 Ярегского месторождения, был проведен анализ

источников тепловыделений данные горные выработки, который показал, что существенный вклад вносят прорывы пара. Предположительной проблемой будет являться трещиноватость горного массива, перегрев продуктивного пласта.

Таблица 1 – Результаты замеров температур горного массива и горной выработки уклонного блока 1Т-4

Номер точки замера	Температура горного массива, С °	Температура горной выработки, С °
1	45,2	34,5
2	36,5	32,7
3	38,0	32,7
4	35,5	32,1
5	35,0	30,3
6	36,2	31,5
7	31,0	30,7
8	33,7	28,8
9	33,1	28,9
10	37,2	33,8
11	40,1	32,4
12	33,5	26,1
13	31,5	25,2
14	40,3	35,1
15	40,5	35,0
16	35,7	35,2
17	23,2	24,4
18	23,5	24,4
19	28,0	24,7
20	21,7	24,7
21	23,5	25,7
22	23,1	27,6
23	24,6	28,5
24	25,7	28,6
25	30,6	29,6
26	33,5	31,7
27	31,2	31,9
28	33,7	32,4
29	35,8	33,8
30	39,6	37,2
31	35,2	35,3
32	41,1	33,2
33	37,5	35,8
34	42,5	36,3
35	46,1	36,1
36	39,0	35,3
37	33,7	34,3
38	38,0	33,1
39	35,5	33,0
40	35,6	34,5
41	62,7	34,6
42	41,2	36,2
43	46,6	39,7

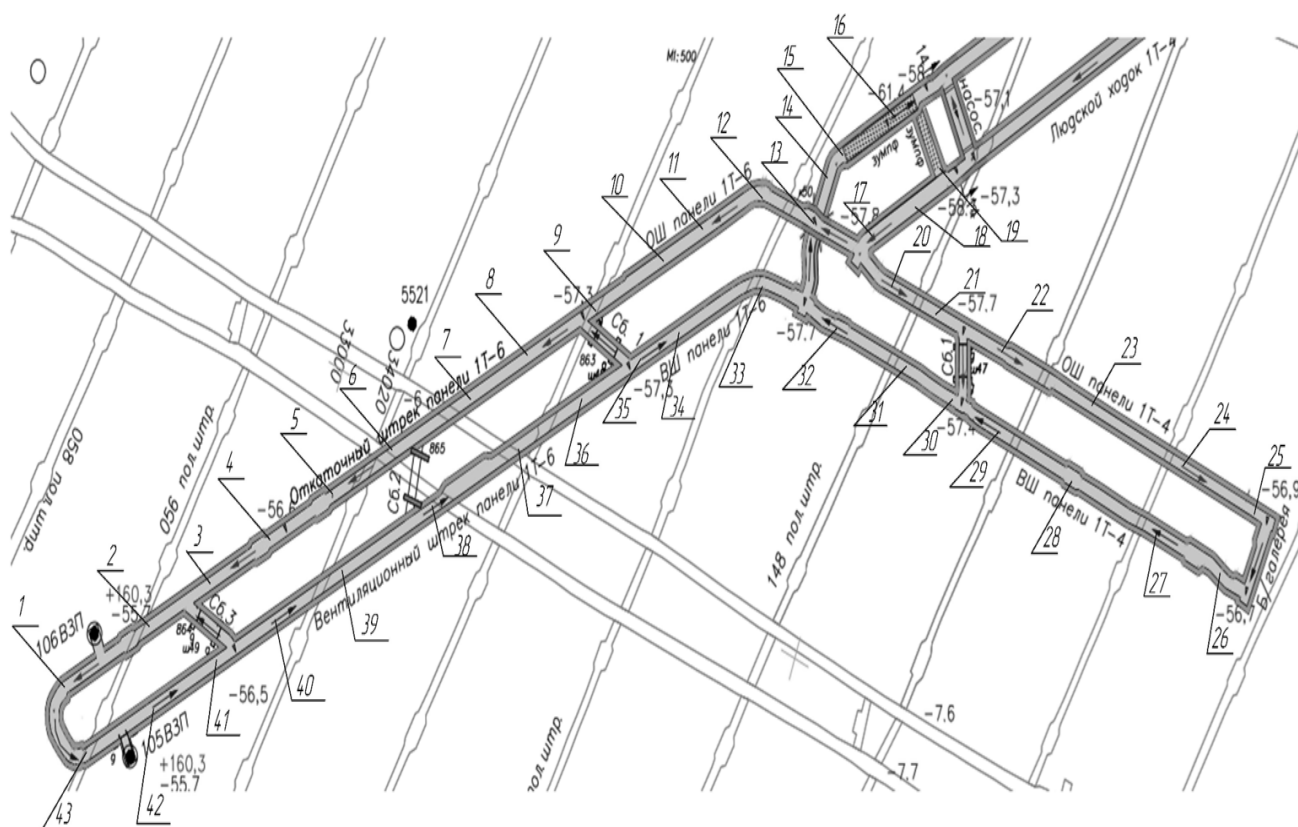


Рисунок 1 - Результаты замеров температур горного массива и горной выработки уклонного блока 1Т-4

Изучения Ярегского месторождения по нефтегазопроявлениям доказали вертикальную миграцию нефти и газа по крупным тектоническим нарушениям из нефтяной залежи в пласте III в процессе её разрушения.

Возможной причиной прорывов является переход на разработку месторождения подземноповерхностным способом, при котором давление закачки пара в пласт значительно превышает начальное пластовое, что, в свою очередь, способствует «раскрыванию» существующих и созданию новых трещин. Как результат, возникновение прорывов пара в изолированные горные выработки и его утечки за счет общешахтной депрессии через вентиляционные перемычки в действующие горные выработки. В результате этого, из-за роста температуры и влажности рудничного воздуха, наряду с ухудшением условий труда подземных рабочих, происходит и интенсивное разрушение крепления горных выработок, образование вывалов, глухих завалов и, в конечном итоге, к нарушению системы общешахтной вентиляции, являющейся основной в функционировании жизнеобеспечения шахты.

#### Библиографический список:

1. Фомин А.И., Шевченко Л.А., Грунско́й Т.В. Улучшение температурного режима на рабочих местах в условиях термошахтной добычи высоковязкой нефти Ярегского месторождения // Безопасность жизнедеятельности. 2021. № 7 (247). С. 12–17.
2. Фомин А.И., Грунско́й Т.В. Улучшение условий труда шахтеров-нефтяников при переходе от термошахтного способа высоковязкой нефти на модульношахтный способ разработки Ярегского месторождения // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 12. С. 58-65.
3. Фомин А.И., Грунско́й Т.В. Поиск эффективных решений разработки месторождений высоковязкой нефти и битумов // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 7. С. 20-25.
4. Бердник А.Г., Грунско́й Т.В., Мартынцева А.С. Аналитическая оценка несчастных случаев при термошахтной добычи высоковязкой нефти // Технологии нефти и газа. 2018. № 3 (116). С. 60-64.

**Синтез и строение магнийсодержащих титанатов висмута**

Пискайкина М. М.

Ухтинский Государственный Технический Университет, г. Ухта, Россия

**Аннотация.** Синтезированы магнийсодержащие титанаты висмута со структурой пироклора. Методами рентгенофазового анализа и сканирующей электронной микроскопии установлена область гомогенности структуры пироклора.

**Ключевые слова:** допированные титанаты висмута, структура пироклора, рентгенофазовый анализ.

Соединениям со структурой пироклора общей формулой  $A_2B_2O_7$  в настоящее время уделяется большое внимание в области синтеза, характеристики и измерения физических свойств. Тщательное и правильное понимание химии и физики замещенных стехиометрических и дефектных пироклоров, связанных с ними материалов позволит в полной мере реализовать их потенциал для практического применения.

Полезность оксидов пироклорного типа в различных устройствах и других областях применения обусловлена их широким спектром свойств, таких как электрические, магнитные, диэлектрические, оптические и каталитические свойства. Эти свойства номинально контролируются такими параметрами, как ионный размер, поляризуемость ионов, электронная конфигурация и иногда условиями приготовления (например, размером частиц и т.д., для определения каталитической активности).

Электрофизические свойства пироклора и родственных ему оксидов широко варьируется от изолирующего до полупроводникового, причем некоторые соединения демонстрируют переход от полупроводника к металлу. Следовательно, эта группа материалов может быть использована в твердотельных устройствах и может быть классифицирована на подгруппы: керамика с высокой диэлектрической проницаемостью, термисторы, толсто пленочные резисторы, переключающие элементы.

Стехиометрические оксидные пироклоры, содержащие элементы в максимальной степени окисления (например,  $Cd_2Nb_2O_7$ ,  $Ln_2Ti_2O_7$ ) и особенно при высокой ионной поляризуемости, обладают хорошими диэлектрическими свойствами. Пироклоры  $Cd_2Nb_2O_7$ ,  $Cd_2Nb_2O_6S$  и родственные им твердые растворы обладают сегнетоэлектрическими свойствами. Диэлектрические постоянные многих ниобатов, танталатов и титанатов довольно велики ( $\epsilon \sim 30-100$ ), и их можно использовать в качестве керамики с высокой диэлектрической проницаемостью.

Оксиды пироклора могут играть полезную роль при переработке ядерных отходов. Радиоактивные отходы необходимо надлежащим образом утилизировать, чтобы избежать опасности окружающей среды. Для утилизации радиоактивных отходов используется технология цементно-песчаных смесей, когда жидкие отходы предварительно переводятся в твердую форму (в стекловидную или кристаллическую матрицу) для удобства транспортировки, обращения и захоронения [1]. Изучение и понимание детальных соотношений фазовой стабильности позволит правильно выбрать добавки для фиксации Ln, Zr, Mo, Ru и других ионов в стабильном пироклоре.

В данной работе получены магнийсодержащие титанаты висмута со структурой пироклора, установлена область гомогенности структуры пироклора.

Сложные титанаты висмута состава  $Bi_{2-y}Mg_xTi_2O_{7-\delta}$  ( $y = 0; 0,6; 0,1 \leq x \leq 0,8$ ) синтезированы методом сжигания нитрат-органических прекурсоров [2].

Для полученных соединений был проведен рентгенофазовый анализ (РФА) на дифрактометре SHIMADZU XRD-6000 с использованием  $CuK_\alpha$  – излучения с  $\lambda = 1.54056$  нм и в угловом интервале от  $10^\circ$  до  $60^\circ$  с шагом  $0,05^\circ$  и временем экспозиции 2 секунды. Полученные рентгенограммы были индифицированы на основе структуры кубического пироклора (пространственная группа  $Fd\bar{3}m$ ).

Фазовый и количественный состав полученных образцов дополнительно изучили при помощи сканирующего электронного микроскопа TESCAN-VEGA 3 SBU.

Согласно РФА полученные образцы состава  $\text{Bi}_{1,4}\text{Ti}_2\text{Mg}_x\text{O}_{7-\delta}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,6$ ),  $\text{Bi}_{1,6}\text{Ti}_2\text{Mg}_x\text{O}_{7-\delta}$  ( $0,05 \leq x \leq 0,3$ ) однофазны и кристаллизуются в структурном типе кубического пироклора (рис. 1).

В системах с эквимольным отношением висмута и титана  $n(\text{Bi})/n(\text{Ti}) = 1:1$ , однофазные соединения со структурой пироклора не образуются, основной фазой является стабильный титанат висмута  $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$  со структурой слоистого перовскита или его твердые растворы  $\text{Bi}_4\text{Ti}_{3-x}\text{Mg}_x\text{O}_{12-\delta}$ .

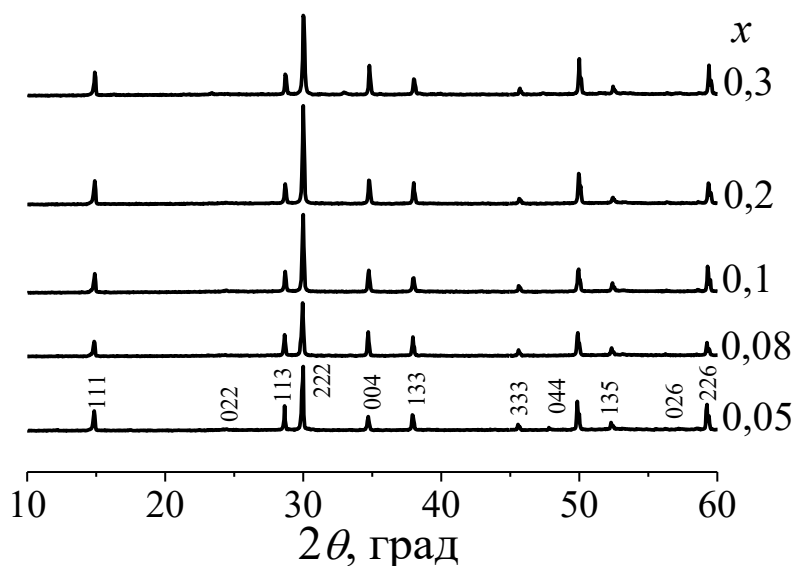


Рисунок 1 - Рентгенограммы образцов  $\text{Bi}_{1,6}\text{Mg}_x\text{Ti}_2\text{O}_{7-\delta}$

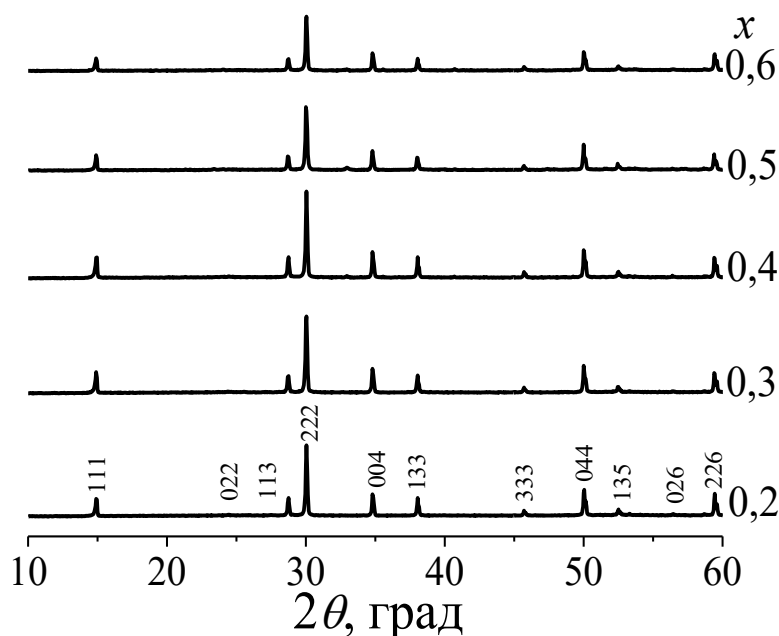


Рисунок 2 - Рентгенограммы образцов  $\text{Bi}_{1,4}\text{Mg}_x\text{Ti}_2\text{O}_{7-\delta}$

Фазовый и количественный состав ряда полученных образцов дополнительно изучили при помощи сканирующего электронного микроскопа (СЭМ).

По результатам СЭМ установлено, что образцы  $\text{Bi}_{1,6}\text{Mg}_x\text{Ti}_2\text{O}_{7-\delta}$  ( $x = 0,1; 0,2$ ) являются однофазными. В образцах  $\text{Bi}_{1,4}\text{Ti}_2\text{Mg}_x\text{O}_{7-\delta}$  ( $0,1 \leq x \leq 0,6$ ) обнаружена вторая фаза, состав которой соответствует титанату магния  $\text{MgTi}_2\text{O}_5$ , содержание примеси не превышает 1%.

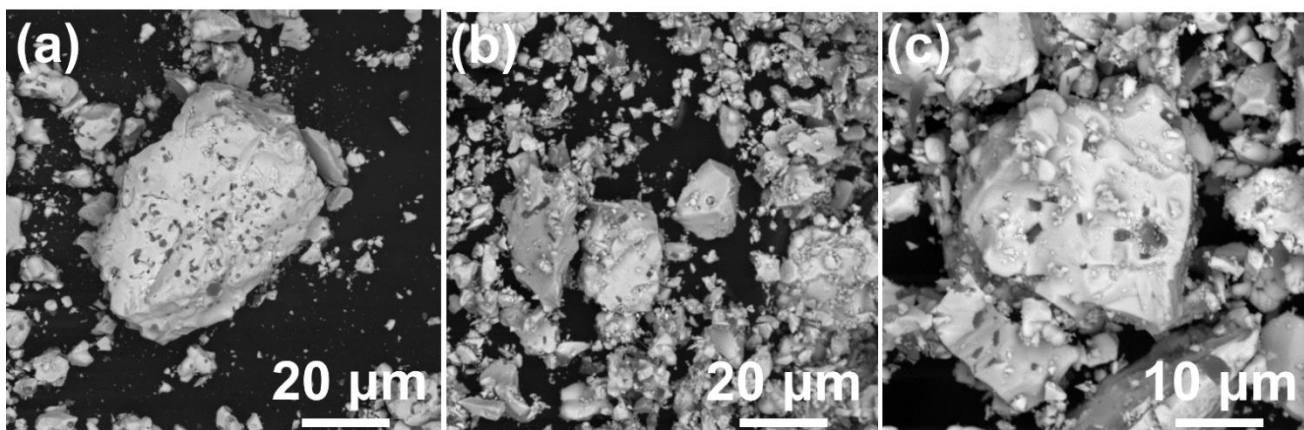


Рисунок 3 - Микрофотографии  $\text{Bi}_{1,4}\text{Mg}_{0,1}\text{Ti}_2\text{O}_{6,2}$  (a),  $\text{Bi}_{1,4}\text{Mg}_{0,2}\text{Ti}_2\text{O}_{6,3}$  (b),  $\text{Bi}_{1,4}\text{Mg}_{0,2}\text{Ti}_2\text{O}_{6,3}$  (c).

На основании результатов РФА и СЭМ установлена область однофазных пирохлоров состава  $\text{Bi}_{1,6}\text{Mg}_x\text{Ti}_2\text{O}_{7-8}$ :  $0,05 \leq x \leq 0,20$ , в системе  $\text{Bi}_{1,4}\text{Mg}_x\text{Ti}_2\text{O}_{7-8}$  ( $0,1 \leq x(\text{Mg}) \leq 0,6$ ) однофазных соединений не обнаружено, содержание примесной фазы не превышает 5%.

#### Библиографический список:

1. Subramania M.A. Oxide pyrochlores — A review / M.A. Subramania, G. Aravamudan, G.V. Subba Rao // J. Solid State Chem. — 1983. — V. 15. — P. 55-143.
2. Краснов А. Г. Протонная проводимость в In, Mg-допированных титанатах висмута со структурой типа пирохлора / А.Г. Краснов, М.М. Пискайкина, И.В. Пийр // Химия в интересах устойчивого развития. — 2016. — № 5 (24). — С. 687–692.
3. Краснов А. Г. Синтез и свойства допированных Sc, Mg титанатов висмута со структурой типа пирохлора / А.Г. Краснов, М.М. Пискайкина, И.В. Пийр // Журнал общей химии. — 2016. — Т. 86. № 2. — С. 177–184.

УДК 614.8.084:364.628

#### Внедрение поведенческого аудита безопасности в лабораторный практикум «Борьба за жизнь»

Поликарпова М. В., Тихомирова К. С.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Наиболее важным вопросом в освоении навыков оказания первой доврачебной помощи является практическая составляющая. В работе представлен обзор проведения лабораторного практикума, а также оценка внедрения в него поведенческого аудита безопасности с целью повышения качества его выполнения.

**Ключевые слова:** безопасность; поведенческий аудит; оказание первой помощи.

Лабораторный практикум «Борьба за жизнь», внедряемый в учебный процесс направления «Техносферная безопасность», представляет собой командные соревнования, целью которых является формирование у обучающихся мировоззрения доброты и сострадания, а также приобретение навыков самостоятельно действовать при различных ситуациях в целях оказания первой доврачебной помощи. В ходе соревнований команды зарабатывают баллы, которые потом суммируются и результаты уже объявляются судьями соревнований.

Лабораторный практикум проводится согласно технологической карте, включающей в себя последовательность действий обучающихся по прохождению испытаний и выполнению заданий по оказанию первой помощи. Типовая технологическая карта представлена в таблице 1.

Лабораторный практикум «Борьба за жизнь» позволяет обучающимся приобрести не только теоретические, но и практические навыки оказания первой доврачебной помощи пострадавшим при любой сложившейся чрезвычайной обстановке.

Отметим, что в ходе проведения практикума, помимо основных баллов, которые

команда зарабатывает за прохождение соревнований, организаторами могут быть начислены как штрафные, так и поощрительные баллы, что служит своего рода стимулированием безопасности деятельности обучающихся.

Доказано, что поведение человека так или иначе зависит от его последствий: в случае, когда за поведение поощряют, человек стремится осуществлять такое поведение более часто; если же наказывают, то изменение поведения в нужном направлении будет иметь меньший временной отрезок. Однако, следует отметить, что наказание наряду с желаемым положительным эффектом почти всегда дает и немало отрицательных последствий: скрытие недостатков в работе, нежелание усовершенствовать процесс. Но самое главное – люди не учатся правильному поведению, а лишь различают ситуации потенциального наказания и временно изменяют свое поведение.

Таблица 1 – Технологическая карта для проведения лабораторного практикума «Борьба за жизнь»

№ п/п	Этапы практикума	Действия участников	Действия проверяющего
1	Организационный момент	Представление команд	Регистрация команд
2	I этап «Оценка»		
2.1	Оценка обстановки и устранение угрожающих факторов	Оценка безопасности подхода к месту происшествия: - явная опасность; - опасность отсутствует.	Контроль правильности оценки, начисление баллов
2.2	Оценка состояния пострадавшего	-Оценка количества пострадавших; -Оценка состояния пострадавшего: - наличие сознания; - отсутствие сознания. Наличие дыхания: - да; - нет.	Контроль правильности оценки, начисление баллов
2.3	Оценка возможности и оснащения	Оценка наличия аптечки и подручных материалов: - да; - нет.	Контроль правильности оценки, начисление баллов
2.4	Оценка условий и средств передачи информации	Вызов скорой медицинской помощи	Контроль правильности оценки, начисление баллов
3	II этап «Действие»	Комплекс сердечно-легочной реанимации. Обзорный осмотр на наличие травм. Оказание помощи: - остановка кровотечения; - наложение шины; - наложение повязки.	Контроль правильности оценки, начисление баллов
4	III этап «Психологическая помощь»	Оказание психологической поддержки	

На рисунках 1 и 2 представлено необходимое для проведения практикума оснащение.





Рисунок 1 – Тренажёр сердечно-лёгочной реанимации «Максим» и вакуумный матрас для оказания первой помощи



Рисунок 2 – Плащевые носилки и медицинская аптечка

Безопасное поведение – это норма, а поведенческий аудит безопасности – это способ формирования данной идеи у всех участников процесса. Аудит безопасности основывается на подходах, доказывающих свое эффективное положительное влияние на поведение людей.

Поведенческий аудит безопасности – это процесс, который подразумевает собой открытое доброжелательное обсуждение работы, выполняемой командой, исключающее любые обвинения, что в свою очередь способствует самостоятельному осознанию собственных неверных действий и их последствий.

Поведенческий аудит безопасности обеспечивается посредством:

- устранения рискованных действий и неграмотного поведения в ходе работы;
- получения подтверждения, что команды работают безопасно и грамотно;
- совершенствования отношения обучающихся к работе;
- улучшения обмена мнениями и взаимодействия в области безопасности.

Основными целями внедрения поведенческого аудита безопасности в практикум «Борьба за жизнь» являются:

- повышение осведомленности в вопросах безопасности;
- наблюдение за эффектом повышения осведомленности;
- мотивация обучающихся.

Похвала за хорошо проделанную работу помогает создавать атмосферу открытости и стимулирует на дальнейшую работу на высоком уровне и исправление имеющихся недостатков.

Процесс аудита поведенческой безопасности включает следующие основные этапы:

- подготовка;
- наблюдение;
- обсуждение;
- подведение итогов.

Правильно внедренная программа поведенческого аудита безопасности позволяет улучшить безопасное поведение и снизить количество неверных действий и порой необратимых последствий, ведь речь идёт о человеческой жизни.

### **Библиографический список:**

1. Бубнов В. Г. Основы медицинских знаний // [Электронный ресурс]: – Москва : АСТ, Астрель, 2005.
2. Поликарпова М. В., Тихомирова К. С. Оценка перспективности внедрения лабораторного практикума «Борьба за жизнь» в образовательный процесс направления подготовки «Техносферная безопасность» [Текст] / М. В. Поликарпова, К. С. Тихомирова // Севергеоэкотех-2023: сб. науч. тр. / УГТУ. – Ухта, 2023. С. 483-486.

УДК 542.06 / 66.091

### **Оптимизация электролизной подготовки рабочего раствора в цикле регенерации магнетита**

Ивенина И. В., Смирнов Ю. Г.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

**Аннотация.** Работа посвящена созданию технологической схемы получения рабочей жидкости наночастиц магнетита, что позволит решить задачу регенерации ферромагнитных наночастиц с целью многократного их использования. Данная технологическая схема разрабатывается в рамках реализации метода разделения водо-нефтяной эмульсии в неоднородном магнитном поле при очистке пластовых и технических вод от нефтяного загрязнения.

**Ключевые слова:** электролиз, регенерация наночастиц магнетита, очистка воды от нефти.

Нефтедобывающая промышленность производит огромные объемы водонефтяной эмульсии, из которой на стадии нефтеподготовки извлекается большая часть товарной нефти. Для увеличения эффективности отделения воды используют деэмульгаторы. Однако после всех стадий разделения пластовая вода по-прежнему содержит достаточное количество трудно отделимой нефти, не имеющей товарного значения. Такая вода не отвечает экологическим требованиям безопасности и не может быть выброшена на ландшафт. Частично ее можно использовать для поддержания пластового давления, но объемы извлекаемой из пласта воды могут значительно превышать количество, необходимое для закачки в пласт. Разбавление загрязненной воды до норм ПДК по содержанию нефти не является решением проблемы. Поэтому остается открытым вопрос по разделению тонкой водонефтяной эмульсии.

Метод отстаивания в данном случае не будет эффективным из-за содержания в составе нефти природных поверхностно-активных веществ, стабилизирующих эмульсию, таких как асфальтены и смолы. Для подобного рода загрязнения эффективными могут быть только биологические и физико-химические методы очистки, к которым относится, в частности, метод разделения водонефтяной эмульсии при помощи ферромагнитных наночастиц в неоднородном магнитном поле. Действенность данного метода была доказана в серии предыдущих исследований [1]. В основе метода физико-химическое взаимодействие на границе раздела трех фаз Ж<sub>1</sub>-Ж<sub>2</sub>-Т, в результате которого происходит агрегация наночастиц магнетита на поверхности микрокапель нефти. Этот процесс можно назвать омагничиванием эмульсии. Омагниченная эмульгированная нефть притягивается к неодимовым магнитам, являющимся главным структурным компонентом магнитных сепараторов. Таким образом, нефть отделяется от воды в виде нефте-магнетитной массы.

Особенностью данной технологии очистки является использование свежесажженного магнетита, что делает нецелесообразным покупку товарной магнитной жидкости, которая по ряду показателей не соответствует предлагаемой методике [2]. Использование свежесажженного магнетита, а также неизбежная проблема утилизации отработанного магнетита, загрязненного нефтью, ставит вопрос о необходимости регенерации очищающего реагента.

Для этого в проект технологической схемы очистки воды был добавлен узел регенерации ферромагнитных наночастиц [3]. Это позволит решить вопрос оптимизации экологической, технической и, в определенной мере, экономической составляющих.

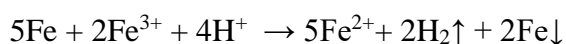
Согласно последовательности операций, нефтьмагнетитная масса подвергается обжигу для удаления углеводородов. Газообразные продукты горения после охлаждения проходят стадию очистки от кислотных газов (СО<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub>) в абсорбере, после чего могут быть выброшены в атмосферу. Твердый остаток содержит преимущественно оксид железа (III), который после измельчения в дробилке растворяют в соляной кислоте. В данной работе изначальная последовательность операций для получения рабочей жидкости дополнена электролизером. Полученный раствор доводят до расчетной концентрации и подвергают частичному электролизу. Продуктом является раствор (FeCl<sub>2</sub> + FeCl<sub>3</sub>), из которого при добавлении щелочи получают рабочую жидкость с наночастицами магнетита для очистки воды.

Таким образом, дополнительно введенная стадия электролизного восстановления железа позволила полностью вернуть железо в рабочий цикл. Электролизный метод заключается в частичном замещении ионов железа Fe<sup>3+</sup> в растворе на ионы Fe<sup>2+</sup> для получения необходимого соотношения, соответственно, 2:1, обязательного для осаждения магнетита. Раствор хлорида железа (III), полученный на одной из стадий регенерации, подвергают электролизу с железным анодом. При этом на электродах происходят следующие реакции:

на аноде:  $Fe^0 - 2e^- \rightarrow Fe^{2+}$  (растворяется анодное железо);

на катоде: 1)  $Fe^{3+} + 3e^- \rightarrow Fe^0$ ; 2)  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Учитывая эквивалентные соотношения в соответствии с законами Фарадея, получаем суммарную электролизную реакцию:



Для выбора оптимальных условий проведения электролиза были исследованы взаимные зависимости следующих характеристик процесса: концентрация - сопротивление, концентрация - мощность, сила тока - мощность, сила тока - выход по току, концентрация - выход по току.

Исследование выхода по току проводили на основании изменения массы анода. Сравнение теоретически рассчитанной и экспериментальной убыли массы анода показало, что выход продукта реакции по току составляет не менее 98% и практически не зависит от силы тока и концентрации раствора.

Сопротивление раствора определяется такими факторами, как ионный состав электролита (величина заряда ионов, размер, подвижность, диаметр), концентрация, температура, вязкость раствора, площадь электродов и расстояние между ними. В условиях эксперимента все характеристики, кроме концентрации раствора, можно считать постоянными. Эксперимент показал, что при уменьшении концентрации электролита (по  $\text{FeCl}_3$ , моль/л) резко возрастает сопротивление раствора. Однако увеличение концентрации более 0,6 моль/л уже не оказывает значительного воздействия на данный параметр.

Связанное с разбавлением раствора увеличение электрического сопротивления, соответственно, приводит к перерасходу энергии (рис. 1).

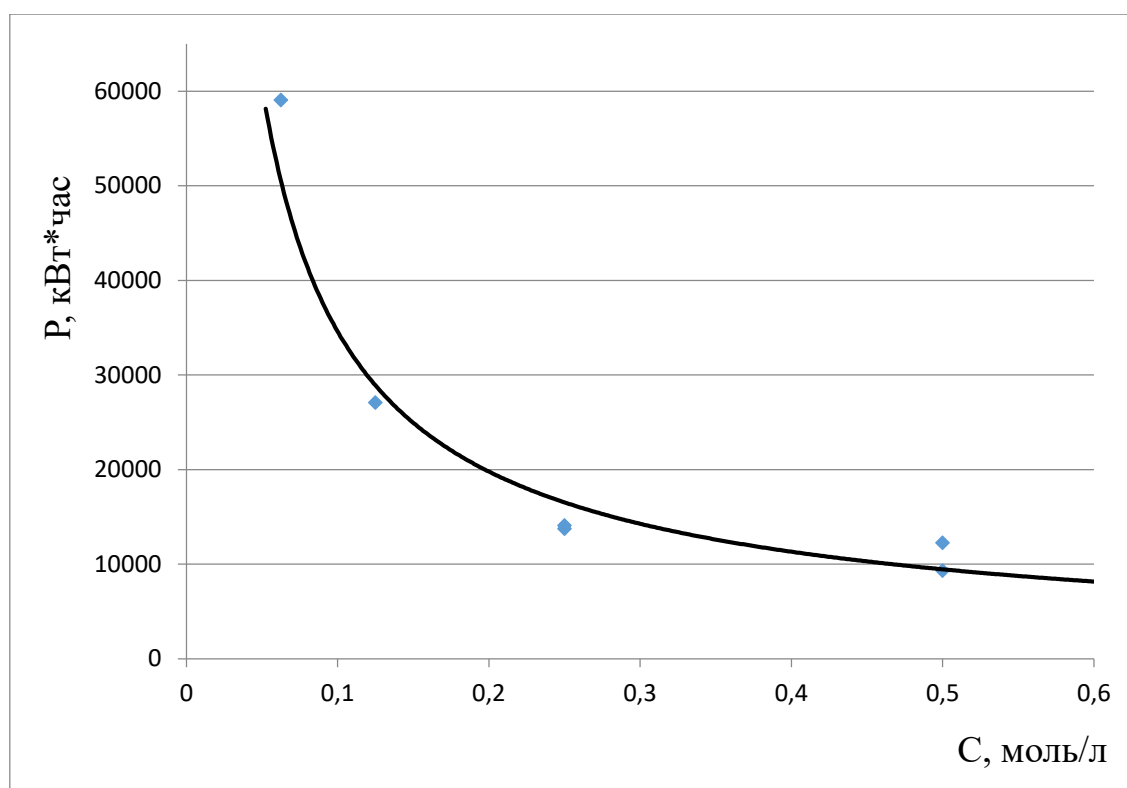


Рисунок 1 - График зависимости расхода электроэнергии (кВт\*ч на 1 кг железа) от молярной концентрации раствора электролита.

Эксперимент показал, концентрация раствора для электролиза должна быть выбрана в диапазоне 0,4-0,7 моль/л, что соответствует относительно низким значениям сопротивления и энергозатрат на электролиз.

После проведения электролизной подготовки раствора и обработки его щелочью с целью осаждения магнетита был получен рабочий раствор для очистки воды от эмульгированной нефти.

Таким образом, схема очистки воды и регенерации магнетита полностью апробирована в лабораторных условиях. Для каждой стадии опытным путем был установлен оптимальный технологический режим. Полученные образцы рабочей жидкости, содержащей ферромагнитные наночастицы, использованы для очистки модельных образцов загрязненной нефтью воды.

После очистки воду исследовали на содержание остаточной нефти. Для измерений использовали однолучевой сканирующий спектрофотометр SQ2800 серии UNICO 280X с

использованием толуола в качестве экстрагента методом экспресс-анализа, описанном в работе [4]. Эффективность очистки при выверенном режиме обработки воды и извлечения нефтемагнетитной массы оказалась достаточной и позволила достичь показаний загрязнения ниже предельного допустимых для нефти 0,3 мг/л.

Отметим, что методика частичного электролиза, целью которой является не получение конечных продуктов электролиза, а лишь частичное превращение одного из компонентов раствора, является оригинальной и не имеющей аналогов.

Таким образом, разработана и опробована в лабораторных условиях технологическая цепочка по получению рабочей жидкости для выделения нефтепродуктов из прямой водонефтяной эмульсии, исключая образование экологически опасных и (или) трудно утилизируемых отходов. Исследование электролизной подготовки раствора полностью завершило цикл регенерации, сделав его практически безотходным (по рабочему раствору).

### **Библиографический список:**

1. Ивенина И.В., Смирнов Ю.Г., Лютоев А.А. Исследование эффективности извлечения нефти из водонефтяной эмульсии при помощи ферромагнитных наночастиц // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – №10. – С. 98-101.
2. Ивенина И.В., Смирнов Ю.Г., Лютоев А.А., Истомина Е.И. Разработка технологии регенерации наночастиц магнетита в процессе очистки воды от эмульгированной нефти // Научно-технический вестник Поволжья. – 2018. – №7. – С. 24-28.
3. Лютоев А. А., Ивенина И.В., Смирнов Ю.Г. Регенерация ферромагнитных наночастиц в ходе тонкой очистки воды от эмульгированной нефти // Рассохинские чтения: материалы международной конференции. В 2 ч. Ч. 2. – 2018. – С. 258-260.
4. Ивенина И. В., Смирнов Ю. Г., Лютоев А. А. Метод экспресс-анализа содержания остаточной нефти в воде [Электронный ресурс] / И. В. Ивенина, Ю. Г. Смирнов, А. А. Лютоев // Электронный научный журнал Ухтинского государственного технического университета "Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения". – 2018. – №2 (12). – С. 5-13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35625389> (дата обращения: 28 мая 2023 г.).

УДК [314.15+325.11](470.13)

### **Комплексная характеристика населения МО ГО «Сосногорск»**

Кожевина К. Е.

Научный руководитель – Лазарева В. Г.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

Ведение статистических демографических данных каждый год указывает на демографическую обстановку какого-либо региона, помогает отследить изменения в составе населения, а также делает возможным определить прогнозы дальнейших изменений.

Основной целью данной статьи является проведение комплексной характеристики населения муниципального образования Республики Коми на примере МО ГО «Сосногорск», а для достижения этой цели были выделены такие задачи, как изучение динамики и состава численности населения, а также социально-экономической и медико-социальной ситуации района.

Характеристика социально-демографических условий района выполнена на основе анализа статистических сборников, информационных бюллетеней, выпусков экспресс-информации Территориального органа Федеральной службы Государственной статистики по Республике Коми; ежегодных государственных докладов о состоянии окружающей природной среды в Республике Коми [9].

*Динамика и состав численности населения.*

Численность населения МО ГО «Сосногорск» на 2023 г. составила 42 221 человек, что на 8004 меньше, чем численность в 2021 г. Плотность населения составляет 891,12 чел./км<sup>2</sup> [1]. Динамика численности населения всего района за период 2021-2023 г. представлена на рис. 1.

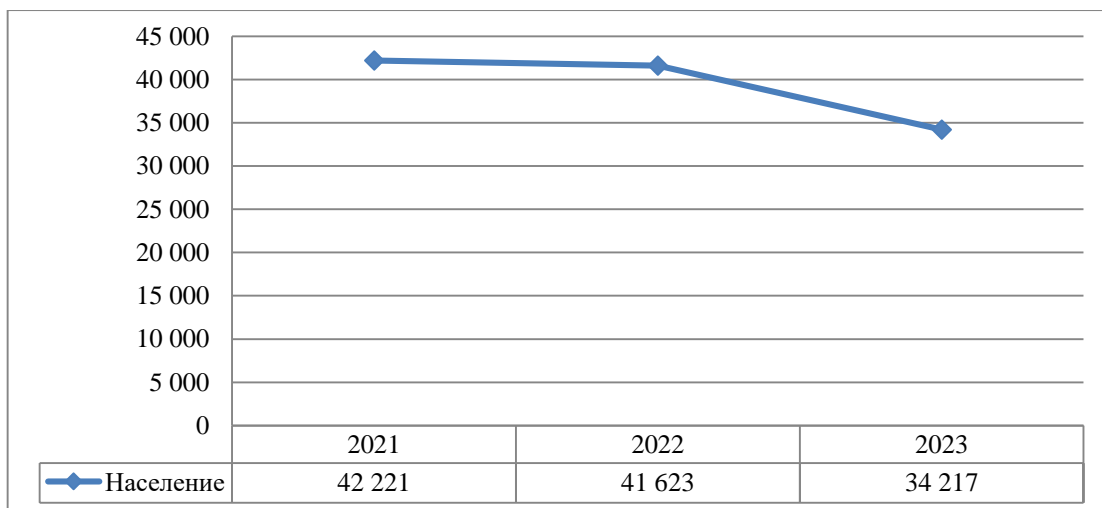


Рисунок 1 – Динамика численности населения МО ГО «Сосногорск», 2021-2023 гг.

Такое сокращение численности населения объясняется в основном оттоком людей в другие места жительства, снижением рождаемости и естественной убылью. Коэффициент естественной убыли населения на 2023 г. составил -5,1, коэффициент миграционной убыли 2,1, коэффициент рождаемости составил 8,2, а коэффициент смертности - 13,3 [2].

Демографическая ситуация 2023 года по сравнению с периодом 2021 года характеризуется уменьшением рождаемости на 56, и также уменьшением смертности на 1. В отчетном году наблюдается преобладание миграционного прироста над оттоком на 44 человека, но при этом количество населения все также продолжает уменьшаться.

В рассматриваемом регионе на 1 апреля 2023 численность населения среди детей составляет 4 241 человек (9,95 %), подростков в возрасте от 7 до 17 лет – 5 051 человек (11,85 %), молодежи от 18 до 29 лет – 5 094 человека (11,95 %), взрослых в возрасте от 30 до 60 лет – 18 351 человек (43,05 %), пожилых людей от 60 лет – 9 293 человека (21,8 %), и долгожителей старше 80 лет – 597 человек (1,4 %) [8].

Динамика численности населения Сосногорска по возрастным группам за период 2021-2023 гг. показана на рисунке 2.

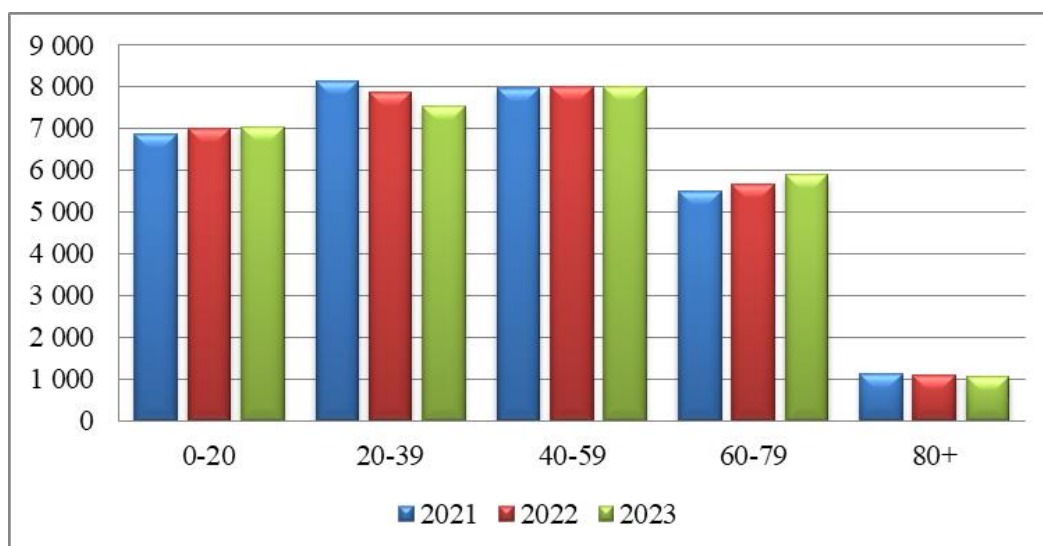


Рисунок 2 – Динамика численности населения Сосногорска по возрастным группам, 2021-2023 гг.

Исходя из данных, наибольшее количество людей на 2023 г. составляют люди в возрастной категории от 40 до 59 лет в количестве 8 002 человек.

Количество женщин на 2023 г. составляет 23 991 человек, что превышает количество мужчин, составляющих 18 637 человек [8]. Необходимо отметить, что превышение количества

женщин над количеством мужчин наблюдается начиная с возрастной стадии 40-59 лет. Среди женщин больше всего людей (4239 человек), находящихся в возрастной стадии 40-59 лет, а среди мужчин (4093 человека) в возрастной стадии 20-39 лет [2]. Данная информация указывает на то, начиная со зрелого возраста, продолжительность жизни мужчин, по сравнению с продолжительностью жизни женщин, снижается.

*Национальный состав населения Сосногорска на период 2021-2023 гг.*

Среди проживающих на рассматриваемой территории представителей национальностей можно выделить следующие. Так, на 2023 г. количество русских составило 27 751 человек (65,10 %) человек, коми – 10 103 (23,70 %) человек, украинцев – 1 790 (4,20 %) человек, татаров – 554 (1,30 %) человека, белорусов – 426 (1,00 %) человек, немцев – 256 (0,60 %) человек, а также других национальностей (менее 0,5% каждая) – 1 748 (4,1%) [9]. Динамику численности людей каждой национальности за 2021-2023 гг. можно наблюдать на рисунке 3.

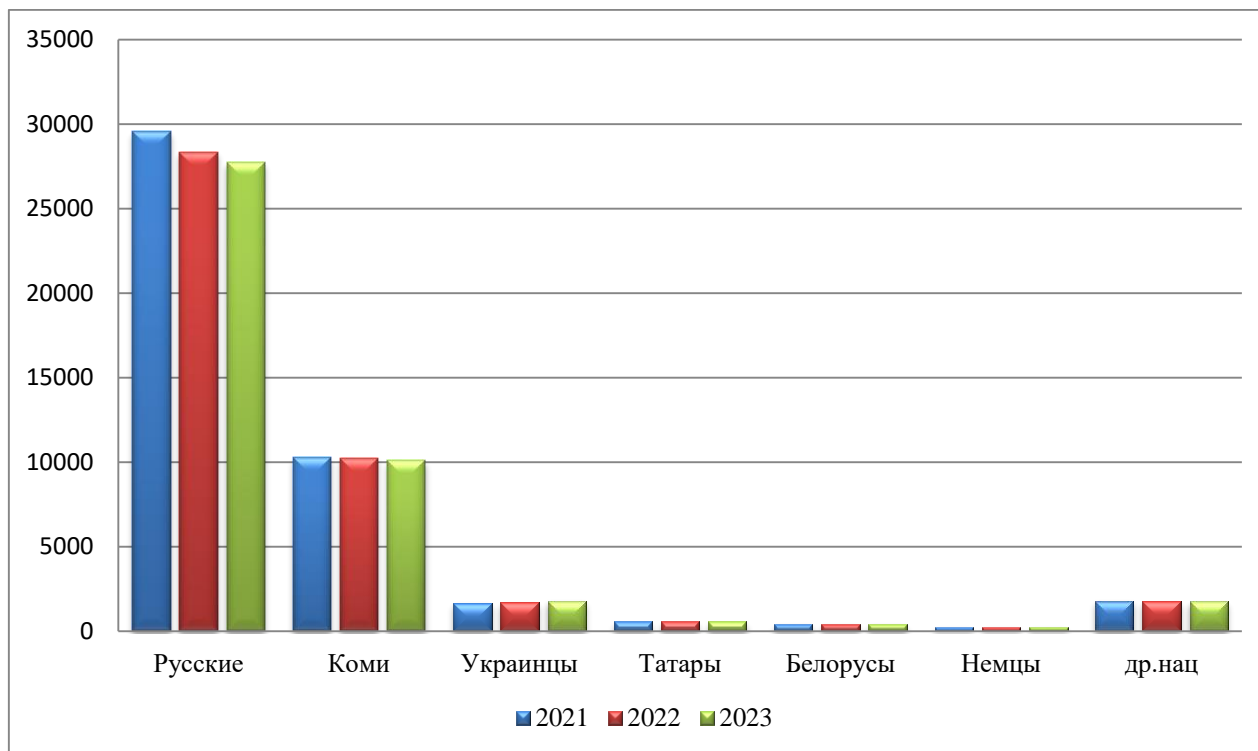


Рисунок 3 – Динамика численности людей каждой национальности за 2021-2023 гг.

Большую долю населения в национальном аспекте за весь рассматриваемый период занимают русские, на 2023 г. составляющие 27 751 человека и долей 68 %, но также заметно падение их численности на 1839 человека. Следует отметить и возрастание количества украинцев за период 2021-2023 гг. на 123 человека, что можно связать с неблагоприятной обстановкой на Украине.

*Социально-экономические условия МО ГО «Сосногорск».*

Основными показателями, характеризующими социально-экономические условия жизни населения, являются состояние рынка труда, показатели занятости и уровня жизни населения. Количество занятого населения рассматриваемого района увеличилось на 803 человека, также снизился уровень безработицы на 803 человека, что связано, по мнению правительства, со стабилизацией экономики страны в целом, и региона в частности, которая оказала положительное влияние на ситуацию на рынке труда.

По данным на 2023 г. в Сосногорске количество официально занятого населения составляет 25 406 человек (59,6 %), пенсионеров 12 362 человека (29 %), а официально оформленных и состоящих на учете безработных 2 472 человека (5,8 %) [9].

Динамика показателей занятости населения за 2021-2023 гг. представлена на рисунке 4.

Большую долю среди населения занимают работающие люди (примерно 62 %), т.е. численность занятого населения превосходит количество безработных и пенсионеров.

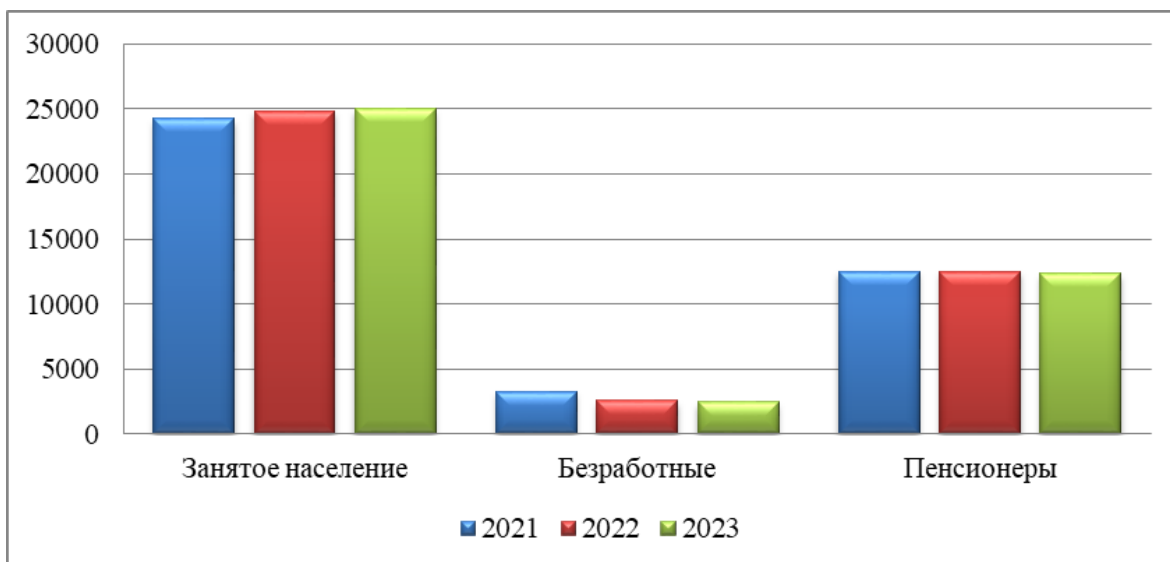


Рисунок 4 – Занятость населения МО ГО «Сосногорск», 2021-2023 гг.

За период исследований количество занятого населения возросло на 803 человека, безработных – снизилось на 803, количество пенсионеров снизилось на 161.

Уровень зарплат в рассматриваемом районе изменился следующим образом (рисунок 5).

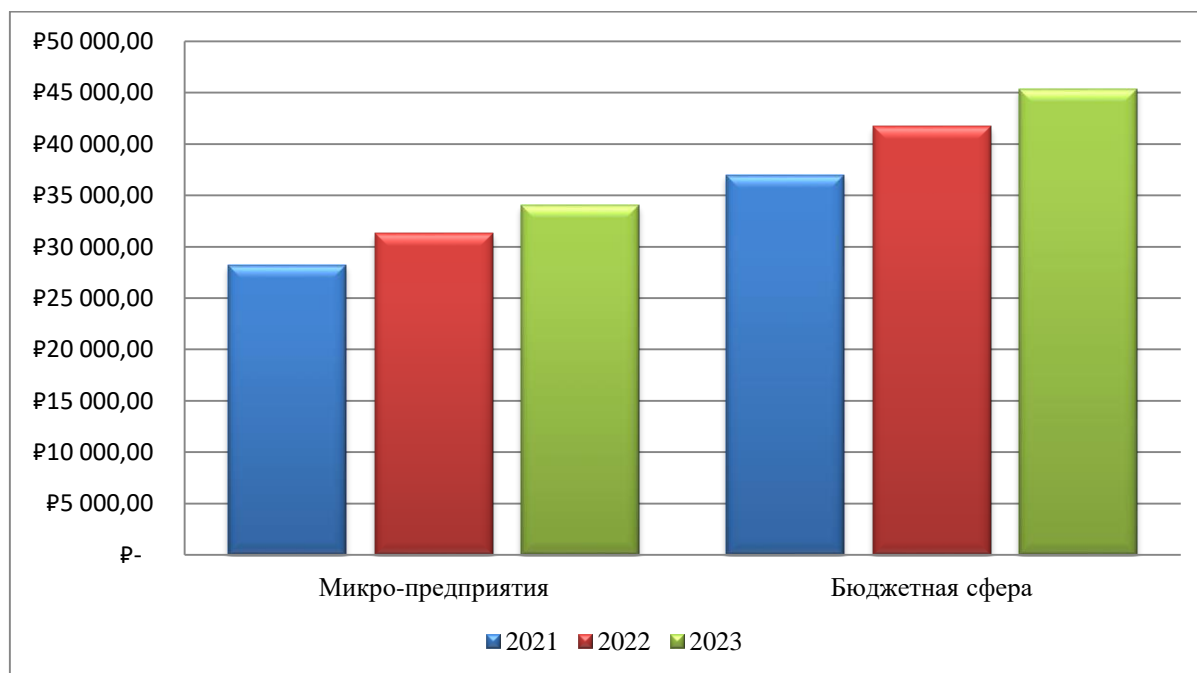


Рисунок 5 – Доля занятости населения Сосногорска, 2021-2023 гг.

Средний уровень зарплат по микро-предприятиям за 2023 г. по сравнению с 2021 г. увеличился на 5820 тыс.руб, а по бюджетной сфере на 8370 тыс.руб. [1].

Большую долю занимают работники в сфере транспортировки и хранения, далее идет обеспечение электрической энергией, газом и паром.

Коэффициент напряжённости на рынке труда составляет – 1,2%, соотношение количества безработных граждан на 1 вакансию – 1,1 % [1].

*Уровень образования жителей Сосногорска за 2021-2023 гг.*

Так, на 2023 г. высшее образование имеют 18,4 % (7 844 человека), неполное высшее – 1,9 % (810 человек), среднее профессиональное – 41,5 % (17 691 человек), 11 классов – 13,5 % (5 755 человек), 9 классов – 10,8% (4 604 человека), 5 классов – 7,7 % (3 282 человека), не имеют образования – 1,0 % (426 человек), неграмотные – 0,2 % (85 человек) [9].

Наглядно динамика уровня образования за 2021-2023 гг. представлена на рисунке 6.



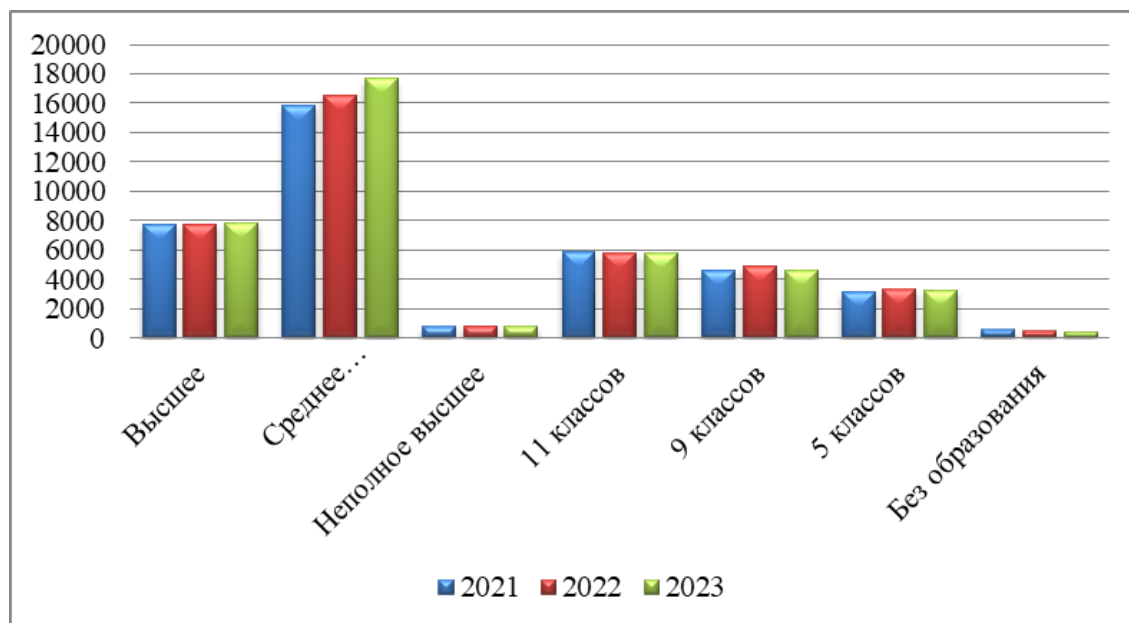


Рисунок 6 – Уровень образования населения МО ГО «Сосногорск», 2021-2023 гг.

Большую долю среди людей с различными уровнями образования занимают люди со средним профессиональным, численность которых за рассматриваемый период повысилась на 101 человека. Также следует отметить повышение количества людей, получивших высшее образование, на 190 человек.

*Медико-социальные условия МО ГО «Сосногорск».*

Рассмотрим количество людей с определенными группами инвалидности.

Всего на 2023 г. среди постоянных жителей Сосногорска инвалидность имеют 3 397 человек, что составляет 7,97 % от всего населения. Инвалидов 1-й группы 401 (0,94 %) человек, инвалидов 2-й группы 1 454 (3,41 %) человек, инвалидов 3-й группы 1 339 (3,14 %) человек, и детей-инвалидов 205 (0,48 %) человек [9].

Среди постоянных жителей Сосногорска на 2023 г. инвалидность имеют 3 397 человек (7,97 %), за рассматриваемый период данное количество снижается. Большая часть представлена инвалидами второй группы. На рисунке 7 представлена динамика численности инвалидов.

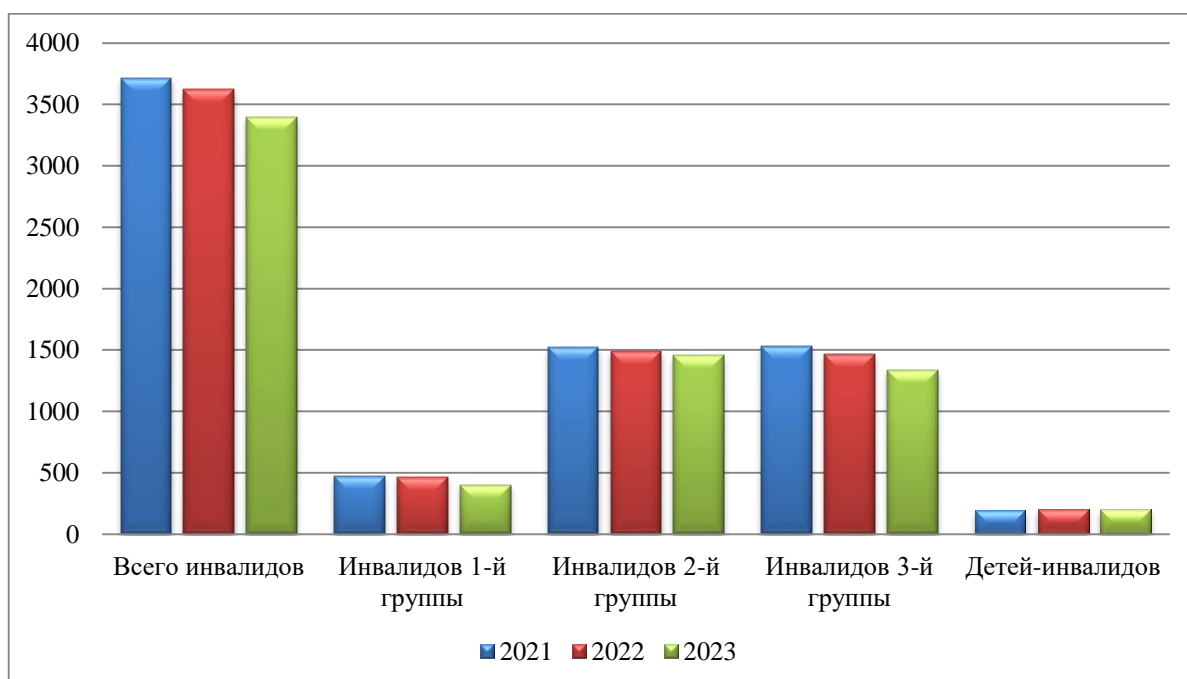


Рисунок 7 – Инвалидность МО ГО «Сосногорск», 2021-2023 гг.

На основании результатов проведенного исследования можно сказать следующее.

Численность населения МО ГО «Сосногорск» на 2023 г. составила 42 221 человек, что на 8004 меньше, чем численность в 2021 г.

Демографическая ситуация 2023 года по сравнению с периодом 2021 года характеризуется уменьшением рождаемости на 56, и также уменьшением смертности на 1.

Все это говорит о том, что демографическая ситуация в МО ГО «Сосногорск» на протяжении ряда лет характеризуется сокращением численности населения, тенденцией к снижению рождаемости, относительным ростом показателей смертности населения, а также миграционным оттоком за пределы республики.

Для улучшения динамики демографических показателей в МО ГО «Сосногорск» должна проводиться комплексная работа, направленная на обеспечение роста численности населения и улучшение качества жизни граждан. Одной из таких работ должно выступить повышение уровня и качества жизни населения на основе устойчивого развития экономики района, для чего нужно создать условия для развития малого и среднего предпринимательства, снижать уровень безработицы, развивать стратегически значимые добывающей и обрабатывающие отрасли. Также нужно вводить дополнительные льготы для работников.

### **Библиографический список:**

1. [https://www.gks.ru/scripts/db\\_inet2/passport/table.aspx?opt=87626100202120222023](https://www.gks.ru/scripts/db_inet2/passport/table.aspx?opt=87626100202120222023)
2. <https://ru.zhujiworld.com/ru/238007-sosnogorsk/>
3. <http://www.komi.gks.ru>
4. <http://www.econom.rkomi.ru>
5. <https://gorodarus.ru/sosnogorsk.html>
6. [www.minzdravrk.ru](http://www.minzdravrk.ru)
7. <http://www.agentsoc.rkomi.ru/>
8. <http://www.komitrud.ru/>
9. <https://bdex.ru/naselenie/respublika-komi/sosnogorsk/>
10. [http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/northern/komi-republic/sosnogorskij/pass\\_ms\\_sosnogorsk.htm](http://openbudget.karelia.ru/budnord/russian/northern/komi-republic/sosnogorskij/pass_ms_sosnogorsk.htm)
11. <https://www.bnkomi.ru/data/news/94326/>

УДК 614.8

### **Определение термина «чрезвычайная ситуация» сквозь призму философских категорий**

Соходон Г. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** На современном этапе одной из основных целей государственной политики Российской Федерации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций являются минимизация рисков чрезвычайных ситуаций, обеспечение гарантированного уровня безопасности личности, общества и государства в пределах научно обоснованных критериев приемлемого риска, устойчивого социально-экономического развития Российской Федерации и ее отдельных территорий. Для достижения указанных целей, необходимо не только обеспечить концентрацию усилий и ресурсов на обеспечение эффективного функционирования и развития единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, но и совершенствование нормативно-правовой базы, и, в первую очередь, её терминологического аппарата [1]. С этой целью рассмотрим возможность методического подхода к определению термина «чрезвычайная ситуация» с использованием категорий философии.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, обстановка, философия, термин, категория.

В Федеральном законе от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ (ред. от 23.06.2020 г.) «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера», дано следующее определение термина «чрезвычайная ситуация»:

«*Чрезвычайная ситуация* – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей» [2].

Обращает на себя внимание то, что понятие «ситуация» в словосочетании «чрезвычайная ситуация» отождествляется с понятием «обстановка» и можно вполне определенно говорить о том, что это тождественные, равнозначные понятия.

Однако, это несколько не соответствует действительности. Попробуем разобраться в этих очень близких понятиях и, в том числе, попытаемся дать обоснованное определение термину «чрезвычайная ситуация» (обратившись к философии, как к системе наиболее общих приемов теоретического и фактического освоения действительности, поскольку она задает общие принципы исследования и основывается на теоретическом мышлении, выраженном в своих философских категориях, принципах и законах).

Методический подход к определению термина «чрезвычайная ситуация» заключается в рассмотрении исследуемых терминов «ситуация», «особенная ситуация», «общая обстановка» и «особенная обстановка» в соотношении с категориями философии «общее – особенное – единичное», в выявлении свойств и отношений рассматриваемых терминов, через закономерности, свойства и отношения соответствующих категорий философии и основных понятий общей теории систем.

Категории философии представляют собой предельно общие, фундаментальные понятия, отражающие наиболее существенные закономерности, связи и отношения реальной действительности и познания. Будучи формами и устойчивыми принципами процесса мышления, категории философии воспроизводят закономерности, свойства и отношения бытия и познания во всеобщей и наиболее концентрированной форме, категории являются узловыми пунктами познания, «ступеньками», «моментами» проникновения мышления в сущность вещей [3].

Известно, что «общее» содержит в себе закономерности протекания процессов в любом единичном явлении данного класса. «Единичное» есть объект, взятый в своем отличии от других объектов в их неповторимой специфике. В то же время, в качестве единичного может рассматриваться не только отдельное явление, но и целый класс, если он берется как нечто одно, а также отдельные свойства или признак явления, если он берётся в своей индивидуальной неповторимости.

Термин «общая обстановка» и «особенная ситуация» – это не равнозначные понятия и явления, и диалектика заключается не в том, что одно существует и другое существует, а в том, что общая обстановка существует и проявляет себя как существующее (тем или иным способом) через особенные ситуации.

Поэтому «общая обстановка» не существует отдельно, а есть закон развития и жизни различных особенных ситуаций.

«Общая обстановка» содержит в себе закономерность протекания процессов в любом единичном явлении данного класса, то есть особенных ситуаций.

Действие закономерности, связи «общей обстановки» выражается только через особенные ситуации и в самой особенной ситуации.

Таким образом, как особенная ситуация невозможна без общей обстановки, так и общая обстановка невозможна без особенной ситуации, которая служит предпосылкой и исходным условием для существования «общей обстановки».

«Особенное» – категория, выражающая реальные явления, как целое в единстве и соотношении его противоположных моментов – «единичного и общего».

Поэтому «особенная обстановка» рассматривается, как нечто, опосредующее отношения между «особенной ситуацией» и «общей обстановкой». При более глубоком рассмотрении «особенная обстановка» выступает не просто как промежуточное звено между «особенной

ситуацией» и «общей обстановкой», а прежде всего, как «объединяющее их начало в рамках «общей обстановки».

Категория «общее» не познаваемо, познание «общего» лежит через «особенное» в «единичном».

В процессе познания явлений, противоположности общего и единичного снимаются, преодолеваются в категории «особенное», поэтому «особенная обстановка» выражает «общую обстановку» в ее реальном единичном воплощении, а «особенную ситуацию» – в ее единстве с «общей обстановкой».

Ситуация в этом случае выступает, как состояние «общей обстановки» на определенной территории и в строго рассматриваемое время, при этом «особенная обстановка» выступает, как реализованная «общая обстановка».

С учётом всего вышеизложенного, можно сформулировать философски обоснованное определение термина «чрезвычайная ситуация»:

*«Чрезвычайная ситуация – это состояние общей обстановки на строго определенной территории, в конкретно рассматриваемое время, сложившееся в результате действий опасных факторов природного или техногенного характера или вооруженных конфликтов, которые могут повлечь или повлекли за собой существенное снижение условий безопасной жизнедеятельности людей и создали угрозу окружающей среде».*

*Выводы.* Проведенным исследованием установлено, что «общая обстановка» на рассматриваемой территории является совокупностью «особенных обстановок», которые в свою очередь создаются различными «особенными ситуациями», в различное время и на этой же территории. При этом, «особенная обстановка» на рассматриваемой территории есть совокупность «особенных ситуаций» одного вида в различное время на этой же территории. «Ситуация», как категория «единичное» для «общей обстановки» есть совокупность различных «особенных ситуаций» в одно и то же время на различных территориях, составляющих рассматриваемую территорию.

В результате анализа дефиниций «ситуация» и «обстановка», выявлена диалектическая взаимозависимость между различными видами обстановок, определено различие в толкованиях понятий «общая обстановка», «особенная обстановка» и «ситуация», показана связь указанных понятий с категориями философии «общее – особенное – единичное» и проведено теоретическое обоснование понятий «ситуация» и «обстановка».

### **Библиографический список:**

1. Комовкина, Л. С. Понятие чрезвычайной ситуации: проблема законодательного определения и теоретико-правовой анализ / Л. С. Комовкина, А. В. Кропачева // Вестник экономической безопасности. – 2016. – № 3. – С. 61-68.
2. Федеральный закон от 21 декабря 1994 г. № 68 «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» // Собрание законодательства Российской Федерации от 26 декабря 1994 г. № 35 ст. 3648.
3. Энциклопедия эпистемологии и философии науки. – Москва : Изд-во «Канон-Плюс», РООИ «Реабилитация», 2009. – 1248 с.

## СЕКЦИЯ 4. ТЕХНОЛОГИЯ И ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

УДК 004.67:[630.64+712]

### К вопросу о применении компьютерных программ в лесном и ландшафтном проектировании

Коломинова М. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы организации учебного процесса по направлениям подготовки бакалавров 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств и 35.03.10 Ландшафтная архитектура. В частности, рассматриваются вопросы применения в обучении компьютерной программы Ландшафтный Дизайн 3D, с помощью которой можно создать проекты благоустройства различных лесных массивов, например, лесопарков, а также приусадебных участков.

**Ключевые слова:** компьютерное проектирование, лесной массив, лесопарк, приусадебный участок.

В учебных планах по направлениям подготовки 35.03.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств и 35.03.10 Ландшафтная архитектура предусмотрено изучение различных дисциплин с применением компьютерных программ.

Для проведения компьютерного проектирования каких-либо лесных массивов сначала производится практическое ознакомление студентов с существующими лесными или лесопарковыми зонами г. Ухты Республики Коми. Город Ухта расположен в центральной части Республики Коми в таежной зоне лесов. На территории города имеются две большие лесопарковые зоны – Детский и Взрослый парки [1].

Детский парк г. Ухты (парк им. М. Горького) был основан в 1952 году и занимает площадь 11 га в старой части города. Парк представляет из себя участок настоящей тайги с аллеями и различными аттракционами (рисунок 1). Это насаждение естественного происхождения. Основная древесная порода – сосна. Формула состава насаждения – 10С.

Взрослый парк г. Ухты (парк КиО им. 40-летия ВЛКСМ) был заложен в 1951 году (рисунок 2). Это насаждение искусственного происхождения. Основная древесная порода – береза. Формула состава насаждения – 10Б.

На практических занятиях по изучению компьютерных технологий в лесном и ландшафтном проектировании предлагается использовать программу от российских разработчиков Ландшафтный Дизайн 3D. В этой программе можно создать реалистичный проект участка и детально рассмотреть его в трехмерном формате [2].

На рисунке 3 приводится проект участка с закрытой беседкой в парке.

Также с помощью этой программы можно разработать проект приусадебного участка. Территория вокруг дома рисуется по размерам. Высоту / длину / ширину каждого из объектов чертежа тоже можно посмотреть, уточнить и изменить при необходимости. Можно изменить при необходимости материал и цвета объекта.

В программу встроена база реалистичных и привычных российскому пользователю объектов: есть жилые и хозяйственные постройки, деревья, цветы и грядки, водоемы и освещение, дорожки и заборы, мебель и садовый декор. Растения подобраны с учетом нашего климата – цветущие кустарники и деревья, морозоустойчивые хвойные, неприхотливые цветы.

В программе можно посмотреть, как будет выглядеть ваш проектируемый участок в разное время суток – утром, днем и вечером.

На рисунке 4 приводится разработанный в программе Ландшафтный дизайн 3D проект приусадебного участка.

В центре участка на рисунке 4 размещен объект альпийская горка, который несомненно служит украшением участка, но его достаточно сложно соорудить с учетом всех рекомендаций

по дренажу, размещению камней и компоновке растений. Проект альпийской горки также при необходимости можно крупно вычертить в программе и увидеть в 3D-формате, как будут смотреться вместе и по отдельности объекты композиции.

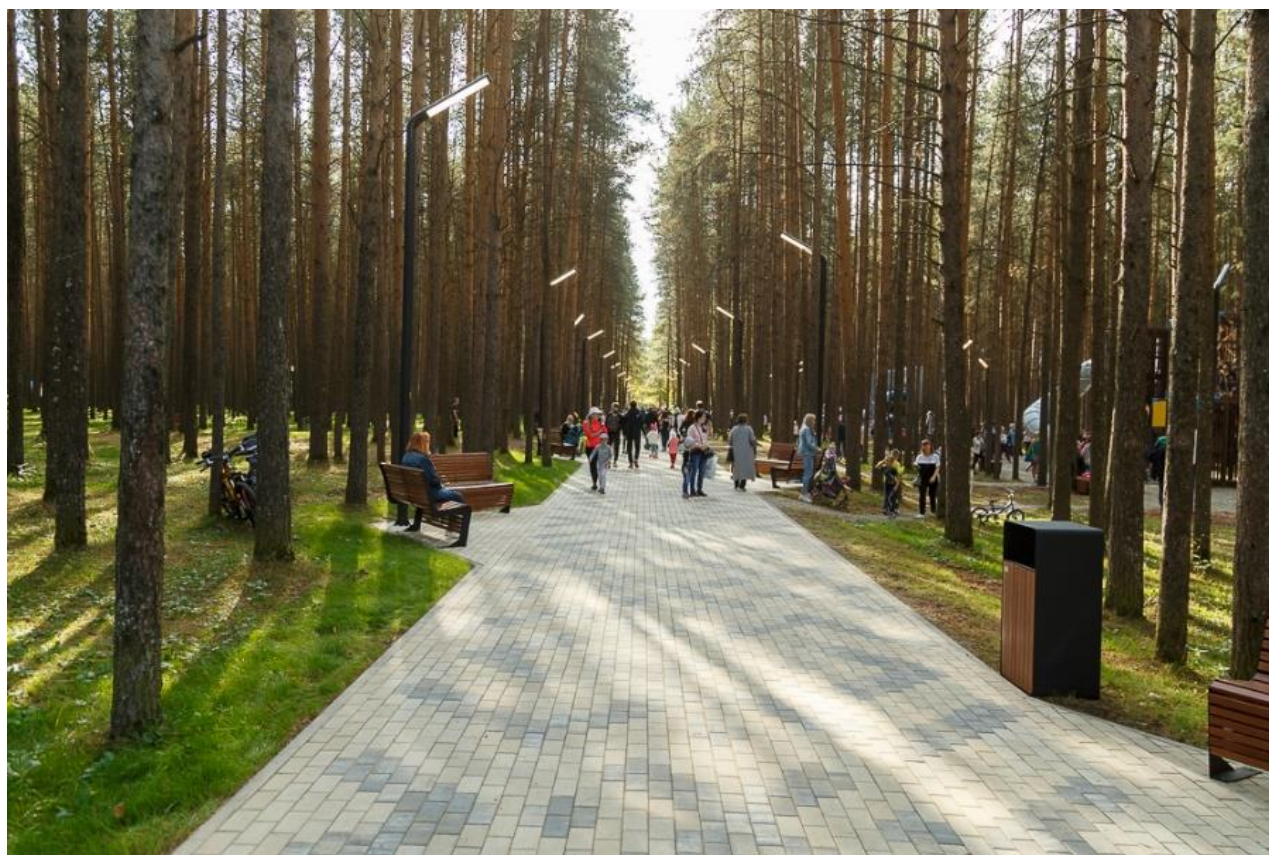


Рисунок 1 – Детский парк

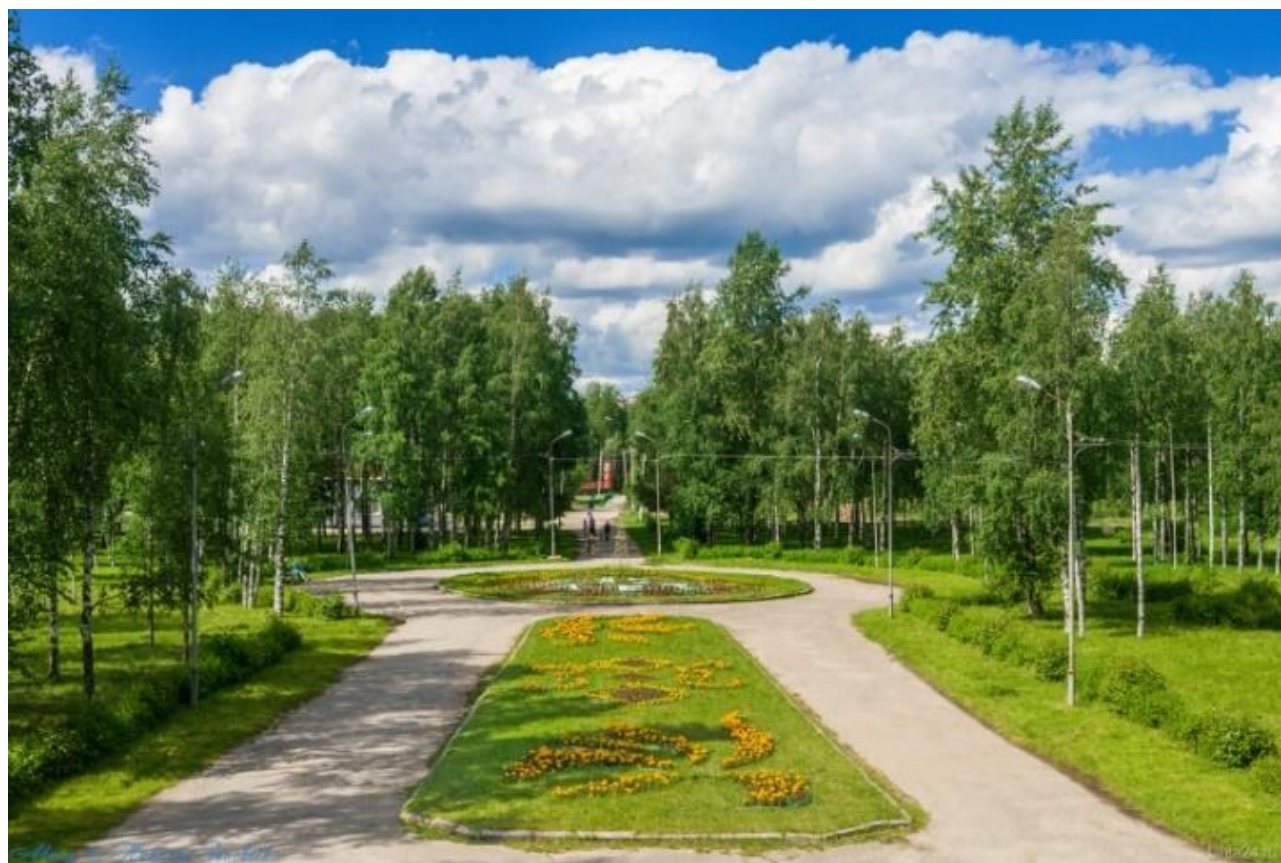


Рисунок 2 – Взрослый парк

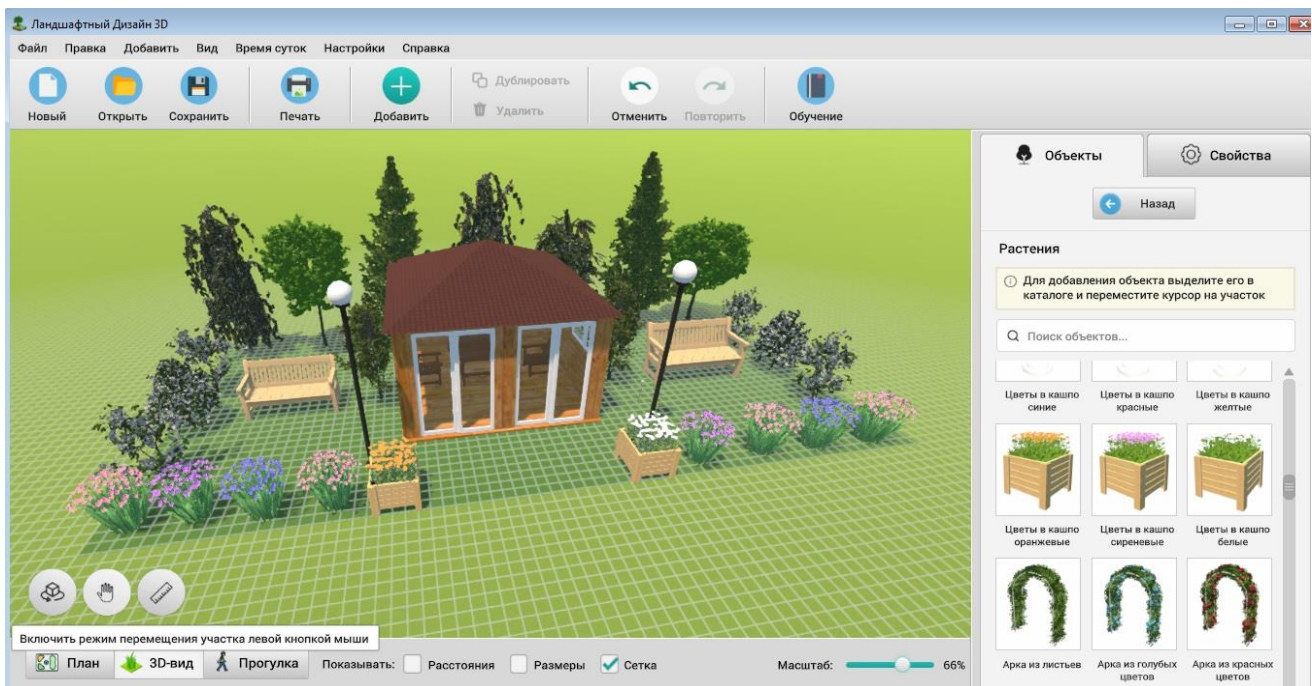


Рисунок 3 – Проект участка с закрытой беседкой в парке

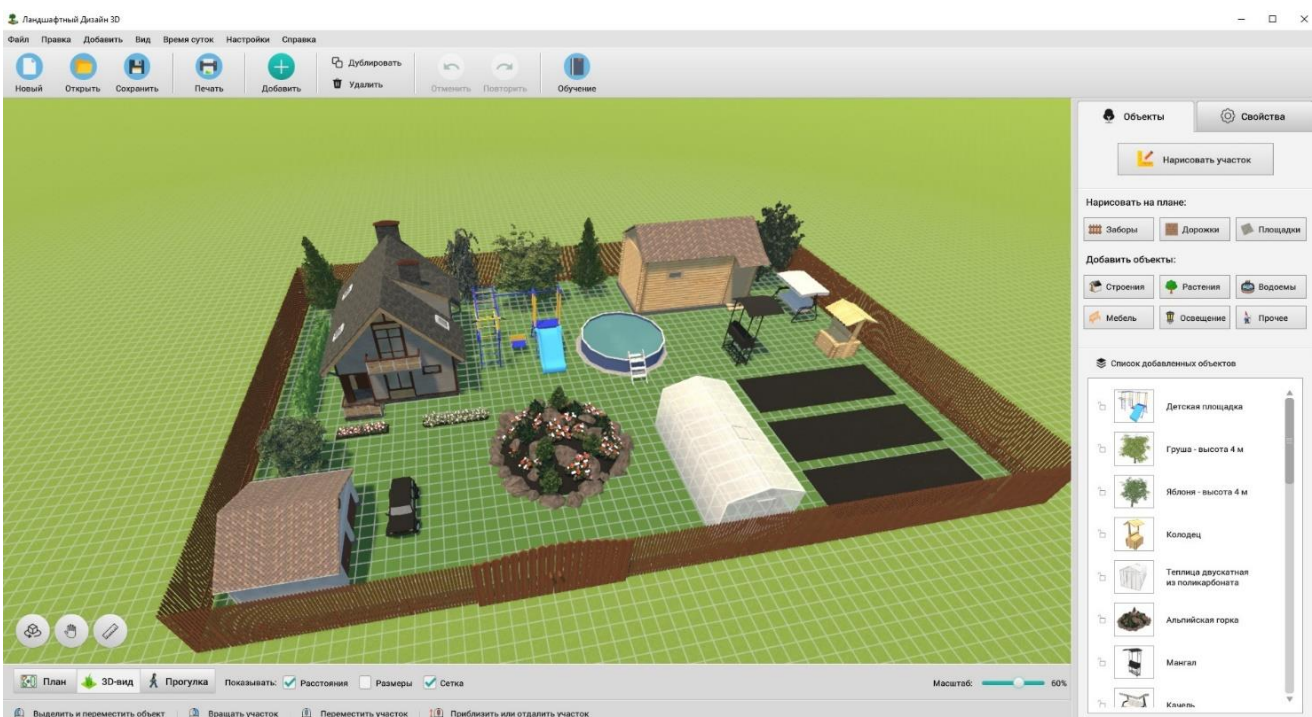


Рисунок 4 – Проект приусадебного участка

Таким образом, применение компьютерных программ для лесного и ландшафтного проектирования делает учебный процесс интересным и насыщенным, позволяет сформировать необходимые профессиональные компетенции.

#### Библиографический список:

1. Чабак Е. Сокровищница Севера / Журнал «ЛесПромИнформ», №7(81), 2011. – с. 32-37.
2. Официальный сайт программы Ландшафтный дизайн 3D. – Режим доступа: <https://landscape3d.ru>.

**Аннотация:** логистика является решающим ключом к экономическому успеху предприятия. Лесная логистика обеспечивает возросшие требования, такие как связь, координация и сотрудничество между компаниями, от поставщиков необработанной древесины до потребителей.

**Ключевые слова:** логистика, информационная система, древесина.

Интеллектуальные программные решения, современные передачи данных и инновационные транспортные системы делают логистику значимой.

Сегодня логистика – это решающий ключ к экономическому успеху предприятия. После того, как потенциал рационализации в сферах производства наибольших отраслей значительно израсходован, в логистике имеется еще многое, что можно улучшить. Это также касается, в частности, лесного хозяйства и лесной промышленности, которые все больше должны утвердиться на глобальном рынке леса. Быстрый и безошибочный поток данных о процессах продажи и транспортных процессах также важен как правильное планирование поездок с опорой на программное обеспечение с инновационными транспортными системами. Наряду с этими техническими решениями и, если партнерские отношения основаны на доверии и взаимодействии всех заинтересованных сторон в цепочке создания добавленной стоимости на древесину – это, тем не менее, существенные условия для предпринимательского успеха [4].

Также в лесозаготовительной и деревообрабатывающей отрасли важность логистики непрерывно увеличивается. В последние годы значительно больше древесины было заготовлено в лесах Сибири. Нарастание перерабатывающих мощностей в лесной промышленности может стать причиной более сильного осушения бассейнов рек. Вместе с ростом цен на топливо и введением новых правил, касающихся времени в пути, времени на отдых и надежного крепления груза, повысятся требования к планированию и контролю перевозок лесоматериалов.

Лесная логистика обеспечивает возросшие требования. Программное обеспечение на основе планирования поездок может уменьшить по дороге движение в холостом пробеге и тем самым снизить затраты. Если данные NavLog доступны в национальном масштабе и соответствующее программное обеспечение улучшает навигацию в лесу, то это является удачным шагом для оптимизированной заготовке леса.

Комбинированные перевозки автомобильным и железнодорожным транспортом приобретают все большее значение по причине роста стоимости электроэнергии, а также, если сборка производится на погрузочных станциях, особенно в сельских участках. Как при транспортировке по железной дороге, так и при транспорте грузового автомобиля увеличены инновационные, гибкие транспортные системы, которые минимизируют издержки на резкое изменение, и которые максимизируют дополнительный заряд и допускают транспорт различных товаров и вместе с тем обратные грузы [3].

В настоящее время находится в разработке новое интернет-программное обеспечение, которое поддерживает экономически эффективное объединение в сеть всех участников цепочки поставок необработанной древесины. Связь, координация и сотрудничество между компаниями, от поставщиков необработанной древесины до потребителей, обеспечиваются без ущерба для внутренних функций сетевых партнеров, таких как операционный и финансовый учет. Это простое сетчатое соединение особенно подходит для использования в неоднородных лесных структурах. Бизнес-модель разработки, распространения и поддержки программного обеспечения также является инновационной.

В последнее время владельцы лесов и лесные подрядчики создали так называемые координационные центры, которые объединяют и продают распределенные лесоматериалы на основе частного сектора, а также помогают координировать услуги по заготовке и



транспортировке древесины. В результате координация, коммуникация и сотрудничество между заинтересованными сторонами становятся все более важной задачей при заготовке необработанной древесины. Эта задача может и должна быть решена максимально эффективно и результативно с использованием современных информационных и коммуникационных технологий [2].

Однако в настоящее время по-прежнему не хватает подходящих отраслевых решений в области информатики, которые отвечали бы этим новым требованиям и обеспечивали бы максимально простое и экономичное отображение сети. На этом фоне разрабатывается, тестируется и внедряется на практике имея экономичную, гибкую в долгосрочной перспективе информационную систему «IFIS» [4].

Чтобы оставаться конкурентоспособными в долгосрочной перспективе, организация, планирование, управление, обработка и контроль лесозаготовительных, лесохозяйственных и информационных потоков должны быть автоматизированы и упрощены. Интегрированная информационная система лесного хозяйства "IFIS" предназначена для поддержки всего процесса продажи и поставки древесины через координационные центры.

Для этого он должен удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечение простой и быстрой межфирменной коммуникации, координации и сотрудничества между партнерами;
- удовлетворение функциональных внутренних потребностей;
- иметь благоприятное соотношение затрат и выгод;
- вовлекать всех соответствующих участников и функциональные возможности;
- быть основанным на современных технологиях, то есть быть компонентным и иметь многоуровневую архитектуру.

На рынке существует множество систем, не связанных с лесным хозяйством и лесоводством, которые в основном включают упомянутые соответствия и требования к ним. В последние годы эти системы тестировались в несколько этапов и оценивались на предмет соответствия поставленным задачам.

В результате получилось следующее:

- системы, не относящиеся к лесному хозяйству, в большинстве случаев трудно адаптировать к лесному хозяйству;
- зачастую они слишком дороги для применения в лесном хозяйстве.

Основным результатом всего процесса оценки было то, что для устойчивого в будущем решением для коммуникации, координации и сотрудничества заключается в разработке новой интегрированной информационной системы лесного хозяйства, охватывающей все упомянутые ключевые требования.

Вопреки всем программным решениям, информационным технологиям и транспортной системе ключ к успешной логистике лежит, прежде всего, в эффективной коммуникации и партнерском взаимодействии всех участников видов деятельности в цепочке, создающих добавленную стоимость на древесину.

#### **Библиографический список:**

1. Салминен Э. О. Лесопромышленная логистика [Текст] : учебное пособие / Э. О. Салминен, А. А. Борозна, Н. А. Тюрин. – Санкт-Петербург : ПРОФИ-ИНФОРМ, 2005. – 264 с.
2. Дыбская В. В. Логистика: интеграция и оптимизация логистических бизнес-процессов в цепях поставок / В. В. Дыбская – Москва: Эксмо, 2008. – 939 с.
3. Курганов В. М. Логистика. Транспорт и склад в цепи поставок товаров: учебно-практическое пособие для студентов высших учебных заведений / В. М. Курганов. – Москва: Книжный мир, 2009. – 512 с.
4. <https://forestcomplex.ru/logistics/lesnaya-logistika> / журнал «Лесной комплекс».

**Анализ теплового режим гидравлического привода трелевочного трактора**

Тимохов Р. С., Тимохова О. М., Шакирзянов Д. И.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

**Аннотация.** В статье проведен анализ теплового режима гидравлического привода трелевочного трактора, работающего в условиях Крайнего Севера. Узлы и механизмы технологических машин, работающих на Крайнем Севере, подвергаются значительным нагрузкам. Исследование теплового баланса гидравлических приводов технологических машин позволит провести оценку работы гидравлических систем тракторов в различных климатических районах и влияния отрицательных температур окружающей среды.

**Ключевые слова:** тепловой режим, гидравлический привод, трелевочный трактор.

Опыт эксплуатации гидравлических систем показывает, что их работоспособность существенно зависит от тепловой нагруженности элементов системы. Узлы и механизмы систем при эксплуатации технологических машин в районах Крайнего Севера [1] работают в крайне тяжёлых эксплуатационных режимах. Нарушение нормального теплового режима гидравлической системы при температурах 0...-50 °С окружающего воздуха приводит к повышению вязкости рабочей жидкости, вызывает повышенное сопротивление при движении жидкости по трубопроводам и узлам гидросистемы. В момент запуска, при работе на жидкостях марок М8Б и АУ, насос некоторое время либо вообще не прокачивает её, либо работает в кавитационном режиме.

Для решения проблемы обеспечения нормального теплового режима гидравлических механизмов необходимо в первую очередь правильно определить количество тепла, которое получает каждый участок системы в зависимости от конструктивного исполнения и размещения.

В существующих гидравлических системах, при низких температурах окружающего воздуха, температура рабочей жидкости не поддерживается в оптимальных пределах, т. к. тепловой баланс не постоянный. Основным источником нагрева жидкости является дросселирование жидкости в регулирующей аппаратуре управления. Жидкость нагревается также при преодолении сопротивлений в процессе движения по рабочим каналам гидравлических агрегатов и систем. Следовательно, температура рабочей жидкости зависит как от температуры окружающего воздуха, так и от напряжённости работы гидромеханизма [2].

$$t_{жс} = t_0 + \frac{Q^T}{k \cdot F}, \quad (1)$$

где  $t_{жс}, t_0$  – температура рабочей жидкости и воздуха;

$Q^T$  – тепло выделяемое гидросистемой;

$F$  – площадь поверхности бака и узлов гидромеханизмов;

$k$  – коэффициент теплоотдачи от бака и узлов гидропривода.

В ряде работ количество тепла, выделяемого гидросистемой, определяют по формуле [3, 4, 5]:

$$Q^T = 632 \cdot N_{пр} \cdot (1 - \eta_{общ}), \quad (2)$$

где  $N_{пр}$  – затраты мощности на привод механизма;

$\eta_{общ}$  – общий к.п.д. системы.

Приводя формулы (2) М. В. Афанасенко [6] указывает, что повышение температуры рабочей жидкости вызвано повышенным износом узлов и падением объёмного к.п.д. Изменение вязкости и механического к.п.д. М. В. Афанасенко не учитывал. В. И. Мудряк, приводивший исследование характеристик насоса, в качестве оптимальной принял температуру +50 °С – отвечающую требованиям ГОСТ. Такая температура наиболее благоприятна для

работы гидросистемы, но фактически в условиях эксплуатации она изменяется от +35 °С в осенне-зимний период, до +80...90 °С в летний.

Верхний предел температуры рабочей жидкости зависит от температуры окружающей среды, интенсивности работы гидропривода, компоновки гидравлической системы, ёмкости баков и рабочих цилиндров. Обычно, при положительной температуре окружающего воздуха, после запуска и нагружения системы через 0,5...1,5 часа [7] устанавливается температура равная 40...80 °С. Работы по изучению теплового режима гидравлических систем не всегда чётко учитывали влияние отрицательных температур окружающего воздуха, особенно если эти температуры находятся в пределах –20...–50 °С. Также не учитывалось влияние на тепловой режим, температуры узлов и агрегатов гидравлической системы, скорости перемещения механизма, временных остановок двигателя, время работы гидропривода на холостом ходу и в рабочем режиме.

Практикуемый в настоящее время метод расчёта теплового режима гидроприводов предполагает, что в каждый момент времени температура всех точек гидропривода одинакова, т. е. происходит достаточно эффективный теплообмен внутри гидропривода, а коэффициент теплопередачи во внешнюю среду и среднее за цикл теплообразование (потери) постоянны. Получающиеся, при решении уравнения теплового баланса, значения температуры характеризуют средний нагрев жидкости в каждый момент времени. Фактически многие агрегаты и узлы гидропривода, расположены в различных местах, что существенно влияет на температуры агрегата и рабочей жидкости.

Наиболее значительные исследования теплового режима провёл Г. А. Кальбус [4]. В своей работе он рассмотрел температурный режим тракторных гидросистем, учёл факторы, определяющие поступления и отвод тепла и вывел формулы для определения времени разогрева рабочей жидкости.

$$\tau = \frac{m_M \cdot c_M + m_{жс} \cdot c_{жс}}{\alpha \cdot F} \cdot \ln \left[ \frac{\frac{Q^T}{\alpha \cdot F} - (t_1 - t_0)}{\frac{Q^T}{\alpha \cdot F} - (t_{жс} - t_0)} \right], \quad (3)$$

где  $m_{жс}, m_M$  – расчётные массы рабочей жидкости бака;  
 $c_{жс}, c_M$  – теплоёмкость рабочей жидкости и бака;  
 $\alpha$  – коэффициент теплопередачи;  
 $F$  – суммарная поверхность, омываемая рабочей жидкостью;  
 $Q^T$  – тепло, выделенное гидросистемой;  
 $t_1$  – температура жидкости и механизмов;  
 $t_0$  – температура атмосферного воздуха;  
 $t_{жс}$  – температура жидкости при  $\tau = 0$ .

Для современных, более сложных схем и конструкции гидропривода допущение о достаточном эффективном внутреннем и внешнем теплообмене может привести к существенным ошибкам, даже при оценке среднего мгновенного значения температуры. Особенно больших значений ошибка может достигнуть для гидроприводов работающих в условиях минусовых температур при осуществлении всех видов теплообмена между отдельными участками гидравлической системы и окружающей среды. В действительности же температура рабочей жидкости на различных участках системы будет иметь какое-то своё значение и в связи с этим интенсивность теплоотдачи от узлов и агрегатов в окружающую среду будет различна. В конечном итоге, это вызовет изменение времени разогрева рабочей жидкости.

Анализ научных исследований, выполненных различными авторами по оценке работы гидравлических систем тракторов в различных климатических районах и влияния отрицательных температур окружающей среды на показатели надёжности гидропривода

показывает, что до настоящего времени отсутствует проверенная методика расчёта гидравлических систем и это не позволяет обоснованно выбрать оптимальный вариант системы для районов Крайнего Севера. Создание такой методики возможно только на основе изучения теплового баланса гидравлической системы и всех видов теплообмена: лучистого, конвективного и за счёт теплопроводности.

В условиях отрицательных температур, наиболее характерным движением жидкости является ламинарный режим течения, при котором теплообмен затруднён, а распределение энергии по слоям весьма неравномерно. При течении жидкости, которое сопровождается её охлаждением, слои жидкости, непосредственно прилегающие к стенке, имеют температуру более низкую, а вязкость более высокую, чем в основном ядре потока. Вследствие этого происходит более интенсивное торможение пристенных слоёв жидкости и уменьшение градиента скорости у стенки.

В своих работах В. Н. Прокофьев и Т. М. Башта [7, 8] для определения зависимости прогрева рабочей жидкости от времени работы, приводят следующую зависимость:

$$t = t_0 + \frac{Q^T}{k \cdot F} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\frac{\tau \cdot k \cdot F}{e^{G \cdot c_m}}} \right), \quad (4)$$

где  $t$  – температура масла за время  $\tau$  час;

$G$  – вес гидропривода с маслом;

$c_m = \frac{c_{жс} \cdot G_{жс} + c_a \cdot G_a}{G_M + G_a}$  – средняя теплоёмкость гидроагрегатов;

$c_{жс}$  – теплоёмкость жидкости;

$c_a$  – теплоёмкость материалов гидроагрегатов;

$G_{жс}, G_a$  – вес рабочей жидкости и вес механизмов гидропривода;

$t_0$  – температура рабочей жидкости в момент запуска;

$\tau$  – время работы гидропривода.

Теоретическое исследование связей между количеством тепла, с учётом тепла, получаемого от внешних источников, проведённое В. Н. Вардугиным [10], позволило определить температуру рабочей жидкости гидросистемы:

$$t = t_0 + (t - t_0)^{\frac{A}{m_c \cdot c_c} \cdot \tau} + \frac{Q_{вн}^T + Q_{внеш}^T}{A} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{A}{m_i \cdot c_i} \cdot \tau} \right), \quad (5)$$

где  $m_c, c_c$  – приведённая масса и теплоёмкость рабочей жидкости и элементов гидросистемы;

$Q_{вн}^T, Q_{внеш}^T$  – количество тепла, полученное за счёт внешних и внутренних источников тепла;

$A$  – постоянная, зависящая от коэффициента  $k$  и поверхности теплоотдачи гидросистемы;

$t_{жс}, t_0$  – температура рабочей жидкости и окружающего воздуха;

$t$  – начальная температура жидкости.


Однако в этих формулах (3, 4, 5) не полностью отражены изменения фактических параметров рабочей жидкости и материала, из которого выполнены узлы и детали гидропривода. Авторы, рассчитывая температуру рабочей жидкости не учитывали все дополнительные источники тепла, которое получает гидравлическая система (излучение,

стыковка с более нагретой деталью и т. д.), также ими не учитывались все виды теплопередачи в окружающую среду и к более металлоёмким деталям.

Исследования влияния температурного фактора на надёжность гидравлических систем, проведённые Л. В. Васильевым [9] показали, при положительной температуре окружающего воздуха через 0,5...1,5 часа после запуска системы устанавливается равным 40...80°C. Он же провёл работу по определению верхних пределов температуры рабочей жидкости при эксплуатации гидроприводов при температуре окружающего воздуха до –20 °С (таблица 1).

При отрицательных температурах, как следует из таблицы 1, большую часть времени гидропривод работает на масле с температурой 20...40 °С. Обращает на себя внимание тот факт, что с понижением температуры окружающей среды время прогрева рабочей жидкости до температуры 30...50 °С возрастает, а при температурах в пределах –10...–20 °С даже при положительном промежутке времени прогрева, температура рабочей жидкости не достигла оптимального параметра, а это значит, что узлы и механизмы гидропривода будут работать в неблагоприятных условиях. Значения, полученные Л. В. Васильевым трудно оценить, т. к. он не указывал на каких марках масел проводился эксперимент и практически невозможно отделить период прогрева от периода начала работы гидромеханизма под нагрузкой, также не проведена оценка времени работы гидромеханизма на холостом ходу и при различных нагрузках.

Таблица 1 – Пределы температуры рабочей жидкости при эксплуатации гидроприводов при температуре окружающего воздуха до –20 °С

Тип агрегата	Вид работы	Температура, °С	Продолжительность работы гидропривода (от момента запуска) в % от времени смены при температуре рабочей жидкости					
			до 10 °С	до 20 °С	до 30 °С	до 40 °С	до 50 °С	до 60 °С
Погрузчик ПФП-1.2 (на базе ДТ-75) 	Погрузка щебёнки	+20 °С	–	–	2...5	3...5	5...10	80...90
		+10 °С	–	1,5...3	2...3	2...5	6...12	75...80
		0 °С	2...4	3...5	5...3	12...20	60...80	–
		–10 °С	2...3	5...10	15...35	45...65	4...7	–
		–20 °С	2...5	3...15	20...60	30...60	–	–

Анализ проведённых научных работ по исследованию теплового режима показывает, что во всех исследованиях не учитывались специфические конструктивные особенности выполнения и размещения узлов и агрегатов, физические свойства рабочих жидкостей и материалов принимались постоянным и не зависящим от температуры, не учитывалось влияние дополнительных источников тепла, а также в расчётах не учитывались все виды теплоотдачи тепла.

Проблема обеспечения нормального теплового режима работы гидравлического механизма может быть успешно решена в том случае, если мы сумеем правильно определить количество тепла, которое выделяется в системе и получается от дополнительных источников. Для этого должен быть разработан специфический метод теплового расчёта. Сущность его заключается в том, что тепловой расчёт должен производиться по отдельным участкам, и каждый участок подлежит тепловому расчёту с учётом своих источников тепловыделения и отвода тепла.

#### Библиографический список:

1. Вардугин, В. Н. Исследование влияния низких температур на показатели работы тракторных гидронасосных систем : дис...канд. технич. наук / В. Н. Вардугин. – Челябинск, 1973.
2. Васильченко, В. А. Испытания гидравлического оборудования в условиях низких температур. Строительные и дорожные машины / В. А. Васильченко. – М. : ЦНИИТЭстроймаш, 1971. – Вып. 4.

3. Альтшуль, А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М. : Наука, 1970.
4. Кальбус, Г. Л. Навесные системы и гидромеханизмы сельскохозяйственных тракторов / Г. Л. Кальбус. – Киев : Машгиз, 1964.
5. Кононов, С. А. Исследование теплового режима системы смазки тракторного двигателя при эксплуатации в холодное время : дис. ... канд. техн. наук / С. А. Кононов. – Омск, 1972.
6. Афанасенко, М. В. Исследование режимов эксплуатации узлов тракторной гидросистемы : дис. ... канд. техн. наук / М. В. Афанасенко. – Воронеж, 1970.
7. Башта, Т. М. Объёмные насосы и гидравлические двигатели / Т. М. Башта. – М. : Машиностроение, 1974. – 605 с.
8. Прокофьев, В. Н. Динамика гидропривода / В. Н. Прокофьев. – М. : Машино-строение, 1972. – 292 с.
9. Васильев, Л. В. Исследование давления в рабочей камере шестерённого насоса / Л. В. Васильев // Труды НАТИ. – М. : НТИ НАТИ, 1971. – Вып. 240. – 179 с.
10. Гавриленко, Б. А. Гидравлический привод / Б. А. Гавриленко, В. А. Минин, С. Н. Рождественский. – М. : Машиностроение, 1968. – 502 с.

УДК 676.014.8

### **Анализ методов экстракции нанофибрилл из целлюлозных волокон**

Андреев С. А.

Научные руководители - Тимохова О. М., Тимохов Р. С.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье проведен анализ методов получения наноцеллюлозы. Материалы на основе наноцеллюлозы являются углеродно-нейтральными, нетоксичными, экологичными и пригодными для вторичной переработки. Поиск новых, эффективных и экологически безопасных средств предварительной обработки целлюлозы остается важной задачей для создания полимерного композиционного материала нового поколения.

**Ключевые слова:** целлюлоза, наноцеллюлоза, механические свойства, механическая обработка.

Целлюлоза – самый распространенный и возобновляемый природный полимер в мире. В течение многих лет она используется в качестве изготовления видов продукции: бумага, картон, искусственные волокна, лакокрасочные материалы, гидролизный спирт и т.д.

В последние годы наблюдается значительный рост интереса к использованию наноцеллюлозы в качестве армирующего полимера для создания высокоэффективных материалов. Основная причина привлекательности наноразмерной целлюлозы заключается в том, что материал с более высокой однородностью и меньшим количеством дефектов с улучшенными механическими свойствами может быть получен за счет уменьшения размера целлюлозного волокна. Его можно использовать в качестве армирующего наполнителя для приготовления композитов с растворами водорастворимых полимеров для изменения вязкости и повышения механических свойств сухих композитов. Наибольшее значение имеет добавление наноцеллюлозы к биоразлагаемым полимерам, что позволяет как улучшить механические свойства, так и ускорить биоразложение [1].

Целью исследования – провести мониторинг различных методов экстракции целлюлозы и выявить наиболее простой и экологически чистый метод изготовления.

Основная причина повышения интереса к наноразмерным материалам связана с тем, что высокооднородный материал с улучшенными механическими свойствами может быть получен за счет уменьшения размера целлюлозного волокна. Он считается экологически чистым материалом из-за его биоразлагаемой природы. Характерные свойства наноцеллюлозы, такие как кристалличность, площадь поверхности и механические свойства, меняются в зависимости от методов экстракции и технологий обработки [2, 3].

В зависимости от технологии и условий синтеза наноцеллюлозы, определяющих ее размеры, состав и свойства, ее можно разделить на основные категории: нанокристаллы целлюлозы; нанофибриллы целлюлозы или нановолокна целлюлозы.

В настоящее время ученые работают над оптимизацией существующих технологий для разработки экологически безопасных методов, которые могут улучшить производственный процесс или наделять наноцеллюлозу новыми свойствами.

Нанокристаллы целлюлозы обычно производятся с использованием кислотного гидролиза целлюлозных материалов, диспергированных в воде. Обычно используется концентрированная серная кислота, которая растворяет аморфные области целлюлозы, а кристаллические области остаются в покое [3]. Хотя этот метод позволяет получить жесткую стержневую структуру нанокристаллов целлюлозы с почти 90% чистотой, сульфатные группы остаются прикрепленными к поверхности волокон в виде примесей. Длина и диаметр нанокристаллов целлюлозы обычно варьируются от 200–500 нм до диаметра 3...35 нм.

Нанофибриллы представляют собой длинные перепутанные фибриллы (мкм) с диаметром в нанометровом диапазоне. Их получают путем измельчения суспензии целлюлозной пульпы под высоким давлением, при этом образуются сильно переплетенные сети нанофибрилл [4]. В отличие от нанокристаллов целлюлозы, которые имеют почти идеальную кристалличность (около 90%), нанофибриллы содержат домены как аморфной, так и кристаллической целлюлозы внутри отдельных волокон. Обычно нанофибриллы имеют диаметр 5–50 нм и длину несколько микрометров [4].

Экстракция нанофибрилл из целлюлозных волокон может осуществляться тремя типами процессов:

- 1 – механической обработкой (например, гомогенизацией, измельчением и помолом);
- 2 – химической обработкой (например, ферментативный гидролиз);
- 3 – сочетание химической и механической обработки [3].

Предварительная обработка древесных целлюлозных волокон позволяет улучшить процесс фибрилляции с увеличением производства нановолокон.

Ферментный гидролиз. Ферменты, обладающие способностью к селективному гидролизу, такие как лакказа, могут разрушать или изменять содержание лигнина и гемицеллюлозы без нарушения содержания целлюлозы [5]. Поскольку целлюлозные волокна содержат множество различных органических соединений в виде композитной структуры, один конкретный фермент не может разрушить волокно.

Авторами [3, 4] наноцеллюлоза добывалась из беленой целлюлозы из мягкой древесины. В этом методе применялся мягкий ферментативный гидролиз с последующей очисткой и гомогенизацией. Было замечено, что мягкий гидролиз с использованием эндоглюканазы увеличивает соотношение сторон без жесткой реакции по сравнению с кислотным гидролизом. Дополнительным преимуществом предварительной обработки ферментами является то, что она увеличивает уровень твердых веществ, что обеспечивает плавный проход во время обработки под высоким давлением [6].

Предварительная щелочно-кислотная обработка – наиболее распространенный метод, используемый для солюбилизации лигнина, гемицеллюлозы и пектина перед механическим выделением нанофибрилл [1 – 6].

#### Механический процесс

Целлюлозные материалы должны пройти механическую обработку для дефибрилляции. Предварительная обработка химическими веществами или ферментами проводится перед механической фибрилляцией, чтобы облегчить процесс. Химическая обработка помогает расширить пространство между гидроксильными группами, увеличить внутреннюю поверхность, изменить кристалличность и разорвать водородные связи целлюлозы, таким образом увеличивая площадь поверхности, что помогает повысить реакционную способность волокон. Существует множество механических методов преобразования целлюлозного волокна в наноцеллюлозу, таких как гомогенизация, микрофлюидизация, измельчение, криодробление и обработка ультразвуком высокой интенсивности.

#### Гомогенизация под высоким давлением

Гомогенизация под высоким давлением – эффективный метод очистки целлюлозных волокон. Он был выведен в 1983 году для добычи нанофибриллярной целлюлозы из древесной массы. Эта процедура очень проста и не требует добавления каких-либо органических растворителей. В этом процессе целлюлозная масса проходит через очень маленькое сопло под высоким давлением. К целлюлозной массе можно приложить много типов сил, таких как высокая скорость и давление, а также силы удара и сдвига, которые влияют на жидкость для создания скоростей сдвига в потоке и уменьшения размера волокон до наномасштаба. У данного метода есть некоторые недостатки, например, такие как засорение волокна. Целлюлозные волокна необходимо очень мелко нарезать и пропустить через гомогенизатор, чтобы избежать этой проблемы. Для производства нановолокон из лубяного волокна кенафа перед процессом гомогенизации под высоким давлением проводится предварительная механическая обработка.

#### Микрофлюидизация

При производстве наноцеллюлозного волокна микрофлюидизаторы работают аналогично гомогенизации под высоким давлением. Микрофлюидизаторы используют усиливающий насос для повышения давления, в то время как камера взаимодействия используется для сдвига и ударных сил против встречных потоков для дефибрилляции волокон. Авторами [5] изучено соотношение сторон целлюлозного волокна и установлено, что волокно нанофибрилл с большей площадью поверхности может быть получено путем многократного прохождения через микрофлюидизатор. Фибриллы целлюлозы показали большее количество гидроксильных (ОН) групп, а также агломерационные свойства из-за большей площади поверхности. Количество проходов через гомогенизатор определяет размер нанофибрилл и площадь его поверхности.

#### Заключение

Наноцеллюлоза, полученная из древесной целлюлозы, обладает уникальными и многообещающими свойствами, такими как высокая кристалличность, коэффициент формы, модули Юнга и прочность на разрыв, которые происходят из свойств микрофибрилл натуральной древесной целлюлозы. Изменение технологии обработки изменяет свойства получаемой наноцеллюлозы, что отражается на конечном продукте. Помимо обычных механических методов, традиционно используемых для приготовления нанофибрилл, таких как измельчение или гомогенизация, обсуждаются другие многообещающие методы, которые могут быть полезны для дальнейших исследований и индустриализации этих материалов. Методы предварительной обработки являются важным шагом для экономически эффективного производства нанофибрилл целлюлозы, поскольку они могут значительно снизить потребление энергии, требуемое во время процесса механического разрушения. Поиск новых, эффективных и экологически безопасных средств предварительной обработки остается важной задачей. Материалы на основе наноцеллюлозы являются углеродно-нейтральными, нетоксичными, экологичными и пригодными для вторичной переработки.

#### Библиографический список:

1. Noorbakhsh-Soltani S.M., Zerafat M.M., Sabbaghi S. A comparative study of gelatin and starch-based nano-composite films modified by nano-cellulose and chitosa for food packaging applications // *Carbohydrate Polymers*, 2018, v. 189, no. 6, pp. 48–55.
2. Pae N., Liew W.C., Muhamad I.I. Production of cellulose nano-crystals from bacterial fermentation // *Materials Today: Proceedings*, 2019, v. 7, part 2, pp. 754–762.
3. Araki J., Wada M., Kuga S., Okano T. Flow properties of microcrystalline cellulose suspension prepared by acid treatment of native cellulose // *Colloids and Surf. A*, 1998, v. 142, no. 1, pp. 75–82.
4. Marchessault R.H., Morehead F.F., Walter N.M. Liquid crystal systems from fibrillar polysaccharides // *Nature*, 1959, v.184, pp. 632–633.
5. Lavoine N., Desloges I., Dufresne A., Bras J. Microfibrillated cellulose – its barrier properties and applications in cellulosic materials: a review // *Carbohydrate Polymers*. 2012, v. 90, no. 3, pp. 735–764.
6. Ranby B.G. Fibrous macromolecular systems. Cellulose and muscle. The colloidal properties of cellulose micelles // *Discuss. Faraday Soc.*, 1951, v. 11, pp. 158–164.



## Производство товаров народного потребления из низкокачественной древесины

Бородулин А. М.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Использовать низкокачественную древесину как полноценное сырье для производства товаров народного потребления.

**Ключевые слова:** древесина, технологический процесс, сырье, товары народного потребления, отходы.

Под низкокачественной древесиной следует понимать лесоматериалы, которые по своим качественным показателям или размерам не соответствуют стандартам и техническим условиям на деловую древесину. Использовать низкокачественную древесину как полноценное сырье можно только либо после предварительной обработки (облагораживания), доводящей ее качество до требований ГОСТ 9462-2016, ГОСТ 9462-2016 и технических условий, либо при снижении выхода конечной продукции по количеству и качеству.

Переработка низкокачественной древесины – это технологические операции (раскалывание, удаление гнили, окорка, продольная распиловка, измельчение древесины) по переработке хлыстов или их отрезков, не соответствующих требованиям нормативно-технической документации, на деловые сортименты, с целью получения колотых балансов, мелких пиломатериалов, технологической щепы и другой деловой продукции

Производство товаров народного потребления организуется в основном на лесопромышленных складах в специальных цехах лесозаготовительных предприятий. Все многообразие товаров народного потребления классифицируется: по виду используемого древесного сырья, по назначению и по способу изготовления. В качестве сырья для переработки используется низкокачественная древесина и отходы лесобрабатывающих цехов.

Технологический процесс производства в цеху товаров народного потребления включает обычно пять операций:

1. Распиловку низкокачественную древесину на пиломатериалы;
2. Искусственную или естественную сушку пиломатериалов;
3. Механическую обработку заготовок;
4. Сборку изделий;
5. Отделку изделий.

Технологический процесс заключается в следующем: сортименты поступают в цех на лесопильные рамы, полученный пиломатериал поступает к торцовочному станку, затем при помощи кран-балки укомплектовывается в пакеты для сушки. Короткомерный сортимент, а также короткомерные деревья поступают к круглопильному станку, полученный пиломатериал поступает к торцовочному станку и после комплектуется в пачки для сушки. Все отходы от лесопильной рамы, круглопильного станка и торцовочного станка поступают к дробительной установке. После процесса сушки весь пиломатериал поступает к торцовочному станку для обрезки на равные размеры. Далее заготовки поступают на соответствующие станки. Производство топорищ осуществляется на станке ФКС. Точеные изделия изготавливаются на токарных станках. Для изготовления черенков и деревянных ручек используется круглопалочный станок. Данный цех в состоянии изготовить за 253 дней в году при двухсменной работе и при годовом объеме 15 тыс. м<sup>3</sup> следующие элементы народного применения: комплекты деталей деревянной ящичной тары – 1830 м<sup>3</sup>, клепка для заливных и сухотарных бочек – 830 м<sup>3</sup>, заготовки из древесины хвойных и лиственных пород – 470 м<sup>3</sup>, топорища – 80441 шт., ручки для молотков – 15000 шт., ручки к ножам – 198589 шт., ручки для лопат – 100000 шт., ручки к сковородкам – 200458 шт. и другой продукции. Номенклатура изделий может меняться в зависимости от спроса. Потребное количество рабочих в смену – 11 человек.

В Республике Коми находится множество лесозаготовительных предприятий, которые ищут множество путей полной реализации лесозаготовительной деятельности, чтобы как можно больше отходов было задействовано в лесной промышленности. Изготовление товаров

народного потребления позволит предприятиям выйти на новый рынок сбыта продукции. Также весьма важен социально экономический эффект развития производства ТНП, обусловленный, в частности, следующими аспектами: повышения спроса на многие виды подобной продукции; вовлечение в производство трудоспособного населения; повышение уровня комплексного использования древесины.

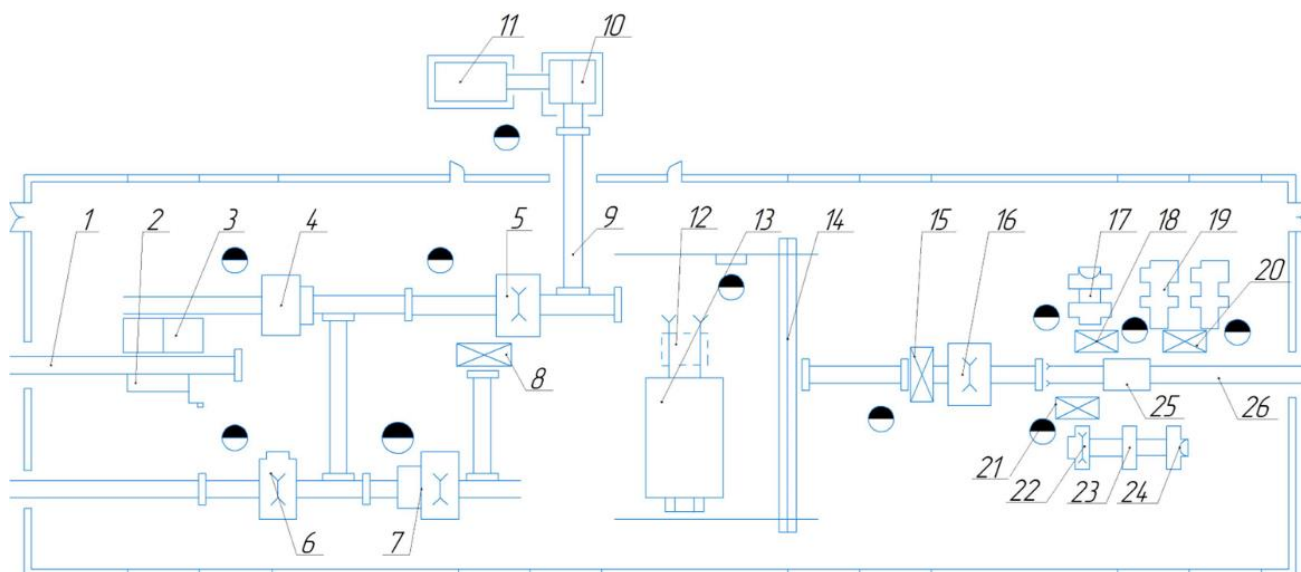


Рисунок 1. – Технологический процесс по производству товаров народного потребления.

#### Библиографический список:

1. Залегаллер Б. П. Технология работ на лесных складах – М.: Лесная промышленность 1980. – 232 с.
2. Гороховский К. Ф. Машины и оборудование лесосечных и лесоскладских работ: учебное пособие для вузов / К.Ф. Гороховский, Н.В. Лившиц. М.: Экология, 1991. – 528 с.
3. Редькин А. К. Технология и проектирование лесных складов: учеб. пособие для вузов / А.К. Редькин, В.Д. Никишов, А.К. Суханов, А.А. Шадрин. М.: Экология, 1991. – 284 с.

УДК 630\*383.2

#### Особенности строительства зимних лесовозных автомобильных дорог

Бурмистрова О. Н., Пильник Ю. Н.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье рассматриваются некоторые особенности строительства зимних лесовозных автомобильных дорог, основанные на физико-механических свойствах снега, которые необходимо учитывать в технологическом процессе.

**Ключевые слова:** снежный покров, зимние лесовозные автомобильные дороги, транспорт леса, жёсткость снега.

Возможность и целесообразность применения снежных улучшенных и ледяных лесовозных автомобильных дорог определяется в основном климатическими и экономическими условиями заготовки древесины.

Если учесть, что в Северо-Западном федеральном округе доля лесозаготовок в зимний период превышает 60%, то проблема перемещения лесоматериалов по снежному покрову становится актуальной. Устойчивая и продолжительная зима создает благоприятные условия для развития зимнего транспорта леса.

Одно из преимуществ зимних дорог - это невысокая стоимость строительства.

Технологический процесс строительства зимних лесовозных автомобильных дорог состоит из подготовительного этапа в теплое время года и в последовательном уплотнении снега по мере выпадения в зимний период.

Для всех типов зимних лесовозных дорог основным дорожно-строительным материалом для устройства проезжей части служит снег, а основанием дорог - мерзлый грунт земляного полотна и при прокладке по естественным водоемам как поперек их (ледяные переправы), так и вдоль (зимние временные автодороги), - речной и озерный лед.

Способность покрытия автомобильных дорог выдерживать нагрузку от действия подвижного состава будет зависеть от физико-механических свойств снега и льда.

Способность снега противостоять образованию колеи под воздействием нагрузки тягового и подвижного состава определяются его твердостью.

Твердость определяется пенетрометром и выражается отношением нагрузки, приложенной к наконечнику индектора, к проекции поверхности его отпечатка на плоскость, перпендикулярно действию нагрузки.

При определении конусом твердость  $H_k$  в МПа равна:

$$H_k = \frac{P}{S}, \quad (1)$$

где  $P$  – нагрузка, Н;  $S$  – площадь отпечатка, мм<sup>2</sup>.

Так как

$$S = \pi r^2 = \pi h^2 \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}, \quad (2)$$

где  $h$  – глубина погружения конуса, мм;  $r$  – радиус проекции отпечатка, мм;  $a$  – угол при вершине конуса, град,

$$\text{то} \quad H_k = \frac{P}{\pi h^2 \operatorname{tg}^2 \frac{a}{2}} \quad (3)$$

при  $a = 45^\circ$ :

$$H_k = \frac{2P}{h^2} \quad (4)$$

При твердости уплотненного снега более 2,5 МПа колея от колес автомобиля практически отсутствует.

Деформация снежного покрова зависит от приложенного давления и может быть определена через коэффициент жесткости снега, который определяется по формуле:

$$\kappa_{жс} = \frac{q}{h}, \quad (5)$$

где  $\kappa_{жс}$  – коэффициент жесткости снега, Н/м<sup>3</sup>;  $q$  – нагрузка на штамп, Па;  $h$  – величина перемещения штампа, м.

По коэффициенту жесткости, задавшись возможной деформацией снежного покрытия, можно определить допустимое нормальное давление.

С течением времени нижние слои снежного покрова будут несколько разрыхляться, а более верхние уплотняться. Это связано с малой теплопроводностью рыхлого снега. С увеличением плотности снега теплопроводность возрастает. В работах Г.Ф. Абельса, А.С. Кондратьевой и др. установлено, что коэффициент теплопроводности снега  $\lambda$  является функцией его плотности  $\gamma$ . Например, в зоне больших плотностей снега (искусственное уплотнение) рекомендуется использовать следующее эмпирическое выражение:

$$\lambda = 3,5587 \gamma^2, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности снега, Вт/м<sup>2</sup> К;  $\gamma$  – плотность снега, г/см<sup>3</sup>.

Плотность снега обуславливается компактностью и степенью излома кристаллов, а также приложенным давлением. Сжатие снегового покрова при температуре от 0 до  $-10^{\circ}\text{C}$  происходит главным образом за счет деформации снежинок.

Зависимость плотности снега от приложенного давления может быть выражена эмпирическим уравнением:

$$\gamma = 0,18 + \frac{0,0038g * (96 - t)}{g + 0,08} \quad (7)$$

где  $g$  - давление,  $\text{кг/см}^2$ ;  $t$  - температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

Из формулы следует, что снег целесообразно уплотнять при температуре, близкой к нулю.

Влияние глубины снежного покрова и характера приложения нагрузки были рассмотрены в работах В.А. Малыгина. Для плоского штампа им была предложена зависимость, характеризующая взаимосвязь между давлением  $q$  и деформацией снега  $h$ :

$$h = \frac{q}{\left(\frac{1}{h_{\max}}\right)q + \kappa_{ж}}, \quad (8)$$

где  $\kappa_{н}$  - коэффициент начальной жесткости снега,  $\text{МПа/м}$ ;  $h_{\max}$  - коэффициент, характеризующий величину деформации снега при давлениях, соответствующих максимальному его уплотнению,  $\text{м}$ .

При использовании цилиндрического штампа нормальное давление в пятне контакта определяется по выражению

$$P = gbR(\alpha + \sin \alpha \cdot \cos \alpha), \quad (9)$$

где  $g$  - давление в нижней точке цилиндрической поверхности,  $\text{МПа}$ ;  $b$  - ширина штампа,  $\text{м}$ ;  $R$  - радиус цилиндрической поверхности,  $\text{м}$ ;  $\alpha$  - центральный угол погруженной в снег поверхности, град.

В этом случае кривая вдавливания приближается к эволюционной характеристике деформации снега.

При сжатии снега напряжение по глубине определяется неравномерно (рис.1), уменьшаясь в нижних слоях. В общем виде для цилиндрических штампов может быть определено по формуле

$$\sigma = \frac{P}{\left(\frac{z}{a}\right)^2 + K}, \quad (10)$$

где  $P$  - нормальное давление,  $\text{МПа}$ ;  $z$  - глубина слоя,  $\text{м}$ ;  $a$  - половина ширины дуги соприкосновения;  $K$  - постоянный коэффициент.

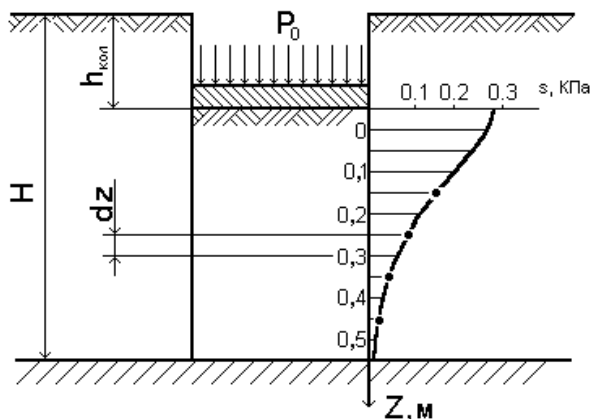


Рисунок 1 - Зависимость распространения напряжений по глубине снежного массива

Следовательно, снег целесообразно уплотнять тонкими слоями по мере его выпадения. Для уплотнения снежного покрова используют следующие методы: выглаживание и укатка. При первом применяют выглаживающие плиты (гладилки), при втором - катки.

Нормальное давление на снеговой покров, зависит от глубины погружения катка в снег. Так величина среднего контактного давления катка  $p_{cp}$ , кг/см<sup>2</sup> по Крагельскому, равна:

$$p_{cp} = \frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{P^2 * C}{R^2 * l^2}}, \quad (11)$$

где  $P$  – нагрузка на валец катка, кг;  $C$  – коэффициент жесткости снежного покрова, кг/см<sup>3</sup>;  $R$  – радиус катка, см;  $l$  – ширина вальца, см

При выборе машин уплотняющего действия необходимо учитывать, что увеличение давления на снежную поверхность не приводит к увеличению плотности.

Следовательно, параметры катка должны соответствовать различным эксплуатационным условиям применения. При неправильно выбранных параметрах катов вместо уплотнения будет происходить нагребание снега перед собой.

Лучших результатов при укатке можно достичь путем предварительного разрыхления. Перемешивание или рыхление снега производят при помощи кулачковых катков, фрез и борон. Снег укатывают легкими катками за 3...4 раза по одному следу, делая перерывы между проходами в зависимости от температуры воздуха: при температуре ниже -20 °С до двух часов; при температуре -10...20 °С до четырех часов. Дорога считается пригодной к эксплуатации не ранее, чем через 4 часа после уплотнения. Плотность снега должна составлять не менее 0,4..0,5 г/см<sup>3</sup> на всем протяжении пути. Наилучшая температура воздуха для укатки снега составляет от -4 до -10 °С. При температуре выше нуля происходит интенсивное налипание снега на рабочие органы дорожных машин, а при более низких температурах снег становится несвязным (рассыпчатым).

### **Библиографический список**

1. Крагельский И. В. Технологический анализ орудий для уплотнения снега. В кн.: Физико-механические свойства снега и их использование в аэродромном и дорожном строительстве. – М. – Л. : Изд-во АН СССР, 1945, с.29-43.
2. Кручинин И. Н. Математическая модель для расчета параметров ходовой части лесотранспортных и лесозаготовительных машин // Изв. высших учебных заведений. Лесной журнал.-2006.-N 1. – С.52-57.
3. Малыгин В. А. Исследование процессов деформации снега под воздействием гусеничного движителя и обоснование выбора размеров опорной поверхности гусениц снегоходных машин. Дисс.канд.техн.наук. -Горький, 1971.-168 с.

УДК 625.7/8

### **Новые технологии строительства автомобильных дорог**

Выборов В. А.

Научный руководитель - Бурмистрова О. Н.

Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия

Наиболее распространенными являются две технологии:

- Асфальтобетон.
- Цементобетон – в свою очередь, такие дороги могут быть монолитными либо сборными (из отдельных плит).

Этапы строительства дорог.

Подготовка основания. Для этого грунт выравнивают и уплотняют.

Затем укладывают слой песка, который будет играть роль подушки. Поверх него насыпают слой щебня.

Повышение прочности покрытия. Как правило, используется георешетка и геотекстиль. Слой геотекстиля укладывают непосредственно на уплотненный грунт – он будет препятствовать проникновению песчинок в основание и защитит от размывания. Георешетка прокладывается между слоем песка и щебнем – она препятствует смешению этих материалов и делает дорожное покрытие более прочным и долговечным.

Финишное покрытие.

Подготовленное основание проливают смесью на основе битума. Затем укладывают финишное покрытие из асфальта или цементобетона. В зависимости от расчетной нагрузки, общая высота дороги может составлять до 2 метров.

Асфальтобетон и его особенности.

Это смесь мелкофракционного щебня, гравия или песка с вяжущей основой. Укладывать асфальтобетон необходимо в горячем виде, после чего покрытие разравнивают и уплотняют техникой. Согласно ГОСТ 9128-2009 температура асфальтобетонной смеси при укладке должна быть не менее 105 градусов по Цельсию. Чем холоднее асфальт – тем хуже он утрамбовывается.

Укладка происходит слоями, толщиной 4-7 см. Для лучшей адгезии используется битум. Асфальтирование дорог и площадок во дворах выполняют в один слой. Дороги со средней нагрузкой – в 2 слоя, шоссе и автострады – в 3 слоя, иногда армируют.

Особенности монтажа цементобетонных дорог.

Это более сложная и длительная технология, но и покрытия в итоге отличаются высокой прочностью и долговечностью. На подготовленное основание монтируют рельс-формы (аналог опалубки), производят армирование поверхности, после чего начинают заливку бетона. Для придания покрытию гладкости используются специальные машины. Для нормального затвердения цемента важно сохранить его во влажном состоянии, поэтому поверхность покрывают пленкообразующими материалами – лаками, каучуковыми или битумными эмульсиями и др. Сборные бетонные дороги делают из готовых армированных плит. Они тоже хорошо выдерживают нагрузку, но слабое место у таких дорог – швы и просадка – даже несколько миллиметров разницы в высоте существенно ухудшают качество езды. Технологии не стоят на месте, специалисты активно ищут замену классическому покрытию. И их разработки действительно впечатляют!

Самоисцеляющийся асфальт

Разработка ученых из Нидерландов. На этапе укладки асфальт насыщают токопроводящими волокнами. Если начинает образовываться трещина, через волокна пропускается электрический ток в непосредственной близости от дефекта. Ток генерирует внутреннее тепло, расплавляя битум – он склеивает обе поверхности трещины. Похожее покрытие разработали и швейцарцы, только в состав асфальта включили мелкие частицы железа и подвергли их воздействию переменного магнитного поля.

Дороги с отведением грунтовых вод

Ученые предлагают использовать проницаемые мостовые материалы для уменьшения ливневых стоков. Также такое свойство не позволит образовываться льду на асфальте. Покрытие спроектировано с пустотами, через которые влага проникает к основанию и выводится через траншею в линию сточных вод.

Дороги с функцией «антизаморозка»

В Японии, где часто наблюдаются снегопады, стали использовать технологию «снежных» труб. В структуру дорожного полотна встраиваются коммуникации, по которым идет горячая вода. Температуры трубы достаточно, чтобы растопить снег. Особо загруженные и важные трассы дополнительно подогревают циркулирующей горячей водой. Другой пример – Solar Roadways, дорожные панели с нагревательными элементами и светодиодами. Вся площадь покрытия превращается в единый нагреватель, под действием постоянного тока 48 вольт асфальт просто не дает скапливаться снегу и влаге. Правда, и цена удовольствия в 2,5 раза выше обычного асфальтобетона.

Дорога для электромобилей

Нет, это не персональное шоссе для электрокаров, это трасса, которая способна подзаряжать аккумулятор транспортного средства. В покрытие встроен специальный рельс, передающий автомобилю электричество во время движения. Такую дорогу построили в Швеции, электричество подается только, когда над рельсом проезжает машина.

#### Дороги из пластика

Разработчики из Голландии уверяют, что такие дороги будут более дешевыми, экологичными и прослужат не менее 80 лет. Проект известен под названием PlasticRoad. Испытания нового покрытия уже ведутся, но пока компания не раскрывает «волшебную формулу». Плиты будут производить из переработанных пластиковых отходов. Укладка таких дорог занимает в 2-3 раза меньше времени, чем асфальтовых. Разработчики заверили, что пластик выдержит температуру до +80 градусов и не накапливает тепло. Для прокладки коммуникаций будут предусмотрены специальные полости.

Предлагаются решения и для уже существующих дорог. Голландские разработчики создали состав Ecosel Asphalt Protection – им обрабатывают поверхность для предотвращения обледенения. Это снижает риск ДТП и уменьшает время и расходы на чистку дорог. Разработчики из Нидерландов создали специальную краску для разметки дорог. С наступлением темноты она начинает светиться. Также в состав включен компонент, который реагирует на снижение температуры: как только она снижается до 0 градусов (дорога становится скользкой), на разметке появляются снежинки, предупреждающие водителей об опасности. Состав уже протестировали, сделав разметку на одном из шоссе возле границы с Бельгией.

#### **Библиографический список:**

1. Пятякин В. И., Салминец Э. О., Бессараб Г. А. и др. Лесозэксплуатация. М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 317 с.
2. Грехов Г. Ф., Тюрин Н. А., Бессараб Г. А., Яблочкин А. А. Сухопутный транспорт леса: Учебное пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2007 – 108 с.
3. Салминен Э. О. Проектирование лесных предприятий: Учебное пособие. СПб.: СПбГЛТА, 2002. – 155 с.
4. Ильин Б. А. Лесные дороги. Ч. 1,2.О.:ЛТА, 1980–1981.4
5. Тюрин Н. А., Борозна А. А. Сухопутный транспорт леса. СПб.:СПБГЛТА, 1993. – 38 с.
6. Грехов Г. Ф., Бессараб Г. А. и др. Дорожное грунтоведение: Методические указания. СПб.: СПбГЛТА, – 2005
7. Инструкция по проектированию лесозаготовительных предприятий. ВСН 01–82. Л.: Гипролестранс, 1983.

УДК 630\*36

#### **Лесозаготовительная машина с автономным отслеживанием**

Вычерова Н. Р., Тимохова О. М.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Во многих отношениях традиционная автоматизация в лесной промышленности достигла своего предела, поскольку водителю приходится иметь дело с избытком информации и принимать слишком много решений в очень быстром темпе. Для дальнейшей автоматизации ожидается и считается необходимым введение полуавтономных и автономных функций. Описывается разработка аппаратного и программного обеспечения беспилотной машины, который перемещает древесину с места вырубki на основные дороги для дальнейшей транспортировки. Представлен новый алгоритм отслеживания пути, который демонстрирует превосходство над стандартными методами, такими как Follow-the-Carrot и Pure-Pursuit. Для облегчения исследований разработана комплексная структура программного обеспечения для взаимодействия датчиков и исполнительных механизмов. Обход препятствий

достигается с помощью нового типа радара, разработанного для автомобильной промышленности. Локализация осуществляется с помощью фильтра Калмана, объединяющего данные кинематического дифференциального датчика GPS / ГЛОНАСС в реальном времени и гироскопа / компаса. Испытания, проведенные на тренажере и небольшом роботе, продемонстрировали многообещающие результаты. Испытания реальной лесозаготовительной машины продолжаются и в настоящее время.

**Ключевые слова:** автоматизация, лесная промышленность

**Введение:** В этой статье описывается текущий проект по и разработке автономной лесозаготовительной машины. Этот вид продукции является частью долгосрочных перспектив лесной промышленности [1] по разработке беспилотного челнока, который доставляет древесину с вырубki на основные дороги для дальнейшей транспортировки. Основными преимуществами такого решения являются более низкие затраты на рабочую силу и меньший ущерб грунту и выбросы из-за меньшего веса беспилотного автомобиля (одна кабина весит несколько тонн). Вместо этого он фокусируется на одном из необходимых компонентов: автономной навигации, которая включает в себя обнаружение и безопасное перемещение по заданному пользователем пути в динамической лесной среде.

Беспилотные автомобили для бездорожья долгое время были активной областью исследований и разработок. Горнодобывающая компания LKAB уже много лет использует автомобили в подземных рудниках с отражающими маркерами, которые помогают лазерной навигационной системе. Из соображений безопасности в сочетании с высокими требованиями к доступности эти системы больше не находятся в коммерческой эксплуатации.

**Обзор системы:** Система работает на двух компьютерах: один, установленный на транспортном средстве, отвечает за аппаратный интерфейс и обработку данных низкого уровня, например, слияние данных в сетке занятости. Этот компьютер связывается через обычную беспроводную локальную сеть (WLAN) с компьютером оператора, на котором выполняются высокоуровневые алгоритмы отслеживания пути и пользовательский интерфейс. В настоящее время оба компьютера работают под управлением Windows XP, хотя она спроектирована таким образом, чтобы ее можно было перенести на другие ОС: например, UNIX или LINUX. Эта независимость от операционной системы зависит от выбора языка реализации, Java и Matlab, поскольку программы, написанные на этих языках, легко перемещаются между различными платформами. В окончательной производственной версии большая часть обработки должна выполняться на мобильном компьютере, а операторский компьютер отвечает только за пользовательский интерфейс.

Модули системы могут находиться на разных компьютерах. Процедуры связи отвечают за маршрутизацию данных и делают фактическое местоположение каждого модуля подходящим для других модулей. Связь между отдельными компьютерами осуществляется через сеть Ethernet, либо напрямую через кабель, либо через беспроводную локальную сеть (WLAN). Оборудование WLAN – это стандартное оборудование со скоростью от 10 до 54 Мбит / с, используемое для офисов и домов. WLAN используется для управления транспортным средством, но, поскольку управление связью ясно для системы, отладку и тесты в офисе можно выполнять либо по кабелю, либо напрямую через компьютер.

Датчики в первую очередь требуются для определения местоположения автомобиля и обнаружения препятствий. Производительность различных типов датчиков и алгоритмов анализа тесно связана с физическим транспортным средством, на котором установлены датчики. Это означает, что подход с несколькими целевыми машинами во время разработки имеет ограниченную ценность для оценки и разработки аппаратного / программного обеспечения датчиков. Ниже приводится описание датчиков, выбранных для конечной целевой машины, лесозаготовительной машины.

Одним из основных типов датчиков для обнаружения препятствий на лесозаготовительной машине является радар. Преимущество радара (радиообнаружение и определение расстояния) по сравнению с датчиками, основанными на ультразвуке или свете, заключается в возможности надежно видеть препятствия в плохих погодных условиях, таких как снег, туман или дождь. Один из типов радаров, используемых в проекте, - пара РЛС последовательного действия С1



производства Тусо - М / А-COM, США (в первую очередь для автомобильной промышленности). Этот радар работает на частоте 24 ГГц и основан на теории моноимпульсов [2]. Дальность и пеленг до цели могут быть получены путем передачи и приема импульсов. Диапазон оценивается путем сопоставления полученного импульса с импульсом с внутренней задержкой по времени. Оценка пеленга цели может быть получена с помощью приемной антенны с переключаемыми характеристиками лепестка,  $\Delta\Delta$  (немного более чувствительным по диагонали) и  $\Sigma\Delta$  (в основном вперед). Пеленг определяется путем вычисления коэффициента аддитивной чувствительности (ASR), определяемого с помощью справочной таблицы в сочетании с информацией о фазе, чтобы различать два возможных направления.

Спутниковая навигационная система RTK DGPS (Real-Time Kinematics Differential GPS), Javad Махог, является основным датчиком положения автомобиля. Стационарный приемник GPS соединен по радиоканалу с мобильным приемником GPS. Сигналы коррекции временных, ионосферных и тропосферных ошибок передаются по радио со стационарного GPS на мобильный, что обеспечивает сантиметровую точность в идеальных условиях.

Для оценки позы в целом и курса в частности используется электронный компас / гироскоп от Crossbow Technology. Модель AHRS 400CC представляет собой девятиосевую измерительную систему с линейными акселерометрами, датчиками скорости вращения и магнитометрами. Что касается акселерометров, то желательно разместить устройство как можно ближе к точке поворота автомобиля. Для самолета это означает центр тяжести, а для форвардера он находится как можно ближе к земле. По этой причине устройство AHRS изначально размещалось на полу в кабине водителя. В идеальном случае фигура должна быть кругом с центром в начале координат. Наклонная эллиптическая форма отклика возникает из-за эффектов мягкого железа (то есть силовые линии магнитного поля изменяются магнитомягким материалом вокруг компаса). Тот факт, что отклик не центрирован в начале координат, связан с эффектами твердого железа (то есть силовые линии магнитного поля выделяются магнитами и намагниченным металлом вокруг компаса). Предполагается, что устройство AHRS устраняет эффекты мягкого и твердого железа путем калибровки, но из-за периодических помех, которые отображаются на рисунке в виде эпициклов, встроенная калибровка не работает. Эпициклическое возмущение возникает из-за трансмиссии форвардера, и поскольку устройство AHRS было размещено на полу кабины водителя, оно было довольно близко к вращающейся трансмиссии. Частота помех соответствует частоте передачи.

Лесозаготовительная машина полностью управляется через промышленную коммуникационную шину CAN. Широко используется в автомобильных системах, он требует только одного подключения нашего оборудования к управляющему компьютеру машины (на самом деле несколько компьютеров, соединенных шиной CAN). Различные аппаратные компоненты позволяют системе управлять дроссельной заслонкой двигателя, скоростью поворота, выбором передачи и т. Д. Некоторые данные датчиков также принимаются через шину, например обороты двигателя, текущий угол поворота и фактический уровень дроссельной заслонки.

**Отслеживание пути и преодоление препятствий:** Чтобы безопасно перемещаться по лесу, был разработан новый алгоритм отслеживания пути под названием Follow-the-Past. Традиционные алгоритмы, такие как Follow-the-Carrot [3] и Pure-Pursuit [4], используют только информацию о местоположении и иногда сталкиваются с проблемами, которых можно избежать, если принять во внимание дополнительную записанную информацию от человека-водителя. Если транспортное средство отклоняется от записанного пути, например, в результате объезда препятствия или из-за шума в датчиках позиционирования, алгоритм Follow-the-Past управляет, как водитель, плюс дополнительный угол, основанный на расстоянии до тропинки.

**Результаты:** Система успешно реализована на симуляторе и на роботе Pioneer. Разработанный алгоритм отслеживания пути работает очень хорошо, а общие инструменты для структуры программного обеспечения роботов оказались одновременно мощными и гибкими.

### **Библиографический список:**

1. Т. Хеллстром. Автономная навигация для лесных машин. Технический отчет UMINF 02.13, факультет компьютерных наук, Университет Умео, август 2002 года.
2. П. З. Пиблз-младший. Принципы радиолокации. Джон Уайли и сыновья, 1998.
3. М. Дж. Бартон. Разработка и внедрение контроллера для планирования маршрута и следования в автономном городском транспортном средстве. Дипломная работа бакалавра, Сиднейский университет, ноябрь 2001 года.
4. Р. К. Коултер. Реализация алгоритма отслеживания траектории чистого преследования. Технический отчет CMU-RI-TR-92-01, Институт робототехники Университета Карнеги-Меллон, Питтсбург, Пенсильвания, январь 1992 года.

УДК 674.093.6

### **Лесопильные процессы с использованием ленточнопильных станков**

Горбиков В. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Лесопильные процессы составляют основу обработки древесного сырья, предназначенного для получения полуфабрикатов (досок, брусков, заготовок, брусьев и т.д.), которыми снабжаются самые разнообразные отрасли промышленности.

**Ключевые слова:** лесопиление, пиломатериалы, заготовка, ленточно-пильные станки, бревна.

Древесина – один из наиболее распространенных материалов, используемых в различных отраслях народного хозяйства. Объёмы заготовок древесины в нашей стране составляют более 360 млн. м<sup>3</sup> в год. Основным потребителем заготавливаемой древесины, как в мире, так и в России является лесопиление.

Основной продукцией лесопильного производства являются: пиломатериалы, черновые заготовки и строганные пиломатериалы.

В ближайшей перспективе намечается техническое перевооружение предприятий лесопильной промышленности на основе прогрессивных технологий с использованием современных высокопроизводительных технических средств. Все больше применяются технология агрегатного производства пиломатериалов, сухопутная сортировка пиловочного сырья перед подачей в распиловку и при выгрузке в запас, механизированная и автоматизированная сортировка получаемых пиломатериалов. Правильно построенный процесс работы лесопильного цеха должен обеспечить рациональное использование древесины, оборудования, площадей при высокой производительности труда и оборудования, равномерном темпе работы на всех участках и полной безопасности работы.

На сегодняшний день в России наблюдается тенденция развития структуры лесной и деревоперерабатывающей промышленности. Лесопильные процессы составляют основу обработки древесного сырья, предназначенного для получения полуфабрикатов (досок, брусков, заготовок, брусьев и т.д.), которыми снабжаются самые разнообразные отрасли промышленности и в первую очередь строительство. Поэтому через лесопильные процессы проходит основная масса заготавливаемой древесины.

Рассмотрим такое оборудование как ленточнопильные станки, которые занимают главное место в процессе лесопиления. Отличие и главное достоинство подобного механизма заключается в наличии гибкой кольцеобразной пилы, благодаря которой можно делать распилы любой формы – прямой и криволинейной.

Ленточнопильные станки имеют следующие преимущества по сравнению с другими станками для распиловки бревен:

- 1) возможность выбора и обеспечение индивидуальной схемы распиловки бревна с учетом качества сырья и пилопродукции;

- 2) возможность выпилки досок с заданным размещением годовых слоев относительно пласти (радиальные или тангенциальные пиломатериалы);
- 3) возможность распиловки крупных бревен, в том числе бревен, которые имеют ядровую гниль (круговым способом);
- 4) сравнительно меньшая ширина пропила и более низкая шероховатость поверхности досок;
- 5) отсутствие необходимости выполнять тщательную сортировку бревен по диаметрам или по качеству перед распиловкой такими станками, так как индивидуальный подход дает возможность учитывать размеры и качество сырья в процессе распиловки.

Ленточнопильные станки бывают:

- вертикальные и горизонтальные;
- однопильные и многопильные;
- с подачей бревна на тележках;
- с конвейерной подачей бревна;
- с перемещением бревна относительно пил;
- с перемещением пильного суппорта относительно стационарно закрепленного бревна.

Выбор и расчет ленточнопильных станков производится с учетом размерно-качественной характеристики сырья и технических показателей станков.

### **Библиографический список:**

1. Залегаллер Б. П. Технология работ на лесных складах – М.: Лесная промышленность 1980. – 232 с.
2. Гороховский К. Ф. Машины и оборудование лесосечных и лесоскладских работ: учебное пособие для вузов [Текст] / К. Ф. Гороховский, Н. В. Лившиц. – М. : Экология, 1991. – 28 с.
3. Солдатов А. В. Технологический расчет объемов сырья при проектировании лесоперерабатывающих цехов; метод, указания для выполнения практических работ, курсового проектирования [Текст] / А. В. Солдатов, В. В. Обвинцев. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехнический университет, 2007. – 37 с.

УДК 62

### **Разработка математической модели деформации снежного покрова на лесной дороге**

Меньшиков С. В., Бурмистрова О. Н., Ужицкий Е. А.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** К транспортно - эксплуатационным показателям лесовозных автомобильных дорог, работающих с сохранением уплотненного слоя снега, можно отнести: толщину уплотненного снежного покрова, плотность слоя, глубину колеи, ровность слоя, коэффициент сцепления автомобилей с поверхностью покрытия, скорость и интенсивность движения автопоездов.

**Ключевые слова:** зимние лесовозные автомобильные дороги, зимний транспорт леса.

**Annotation.** The transport and operational indicators of forest roads that maintain a compressed snow layer include: the thickness of the compacted snow cover, the density of the layer, the depth of the track, the level of the layer, the coefficient of car adhesion to the surface, Speed and intensity of road trains.

**Keywords:** winter forest roads, winter forest transport.

Рассмотрим деформацию снежного покрова конечной глубины  $L$  плоским штампом, с учетом допущений:

- движение осуществляется по ровному, однородному снежному покрову;
- снежный покров рассматриваем как сплошную среду;
- считаем, что снег сжимается абсолютно неупруго и деформации присутствуют только пластические;

– учитывая низкие скорости движения лесовозных автомобилей, принимаем вертикальную скорость нагружения снежного покрова незначительной;

– деформация снежного покрова происходит с изменением плотности в процессе уплотнения, деформация происходит за короткий промежуток времени.

В условиях плоской задачи, примем, что штамп имеет ширину  $b$  и вдавливаются по направлению оси  $OY$  (см. рисунок 1). Под действием внешней силы снежная поверхность деформируется, и штамп погружается на глубину  $U$ . Задача сводится к отысканию смещений точек снежной поверхности  $U(y)$ . Сделаем предположение, что боковое выдавливание снега незначительно.

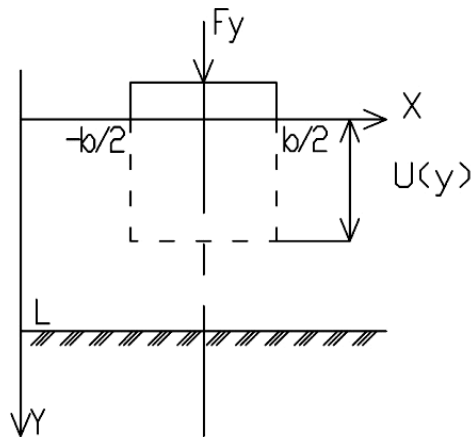


Рисунок 1 - Схема деформации снежного покрова конечной глубины плоским штампом

В случае плоской задачи и однородности среды (напряжения не зависят от деформации, что эквивалентно однородному распределению плотности внутри снежного покрова) данная система вырождается в единственное уравнение для  $\sigma_y = \sigma$ :

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = 0. \quad (1)$$

Учитывая, что внутреннее напряжение  $\sigma$  есть функция деформации  $\varepsilon$ , то деформацию в свою очередь выражается через смещение как:

$$\varepsilon(y) = \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2. \quad (2)$$

Другими словами напряжение можно представить в виде

$$\sigma = f \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 \right). \quad (3)$$

Предположим, что плотность снежного покрова зависит от напряжений и меняется по закону

$$\rho = A\sigma + \rho_0, \quad (4)$$

где  $\rho_0$  – плотность недеформированного снега;

$A$  - некий коэффициент является, который будет определен из решения задачи.

Тогда уравнение (4) примет следующий вид:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = gA\sigma + \rho_0 g = B\sigma + C, \quad (5)$$

где  $\sigma = \sigma_{s0}(\varepsilon + 1)$ ,  $B = gA$ ;  $C = \rho_0 g$ ;  $\sigma_s$  - несущая способность снежного покрова.

Тогда, с учетом геометрии задачи (рисунок 1) выражение для производной напряжений по координате примет вид:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial y} = \sigma_{s_0} \left( \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial U}{\partial y} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

Правая часть уравнения (5) имеет вид:

$$B\sigma + C = B\sigma_{s_0} \left( \frac{\partial U}{\partial y} + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + 1 \right) + C. \quad (7)$$

В результате, уравнение (5) может быть переписано следующим образом:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\frac{B}{2} \left[ \left( \frac{\partial U}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial U}{\partial y} + 2 \right] + C}{\left( 1 + \frac{\partial U}{\partial y} \right)} \quad (8)$$

Это уравнение может быть решено аналитически. Для этого необходимо ввести замену переменных вида

$$\frac{\partial U}{\partial y} = z, \quad z' = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}.$$

Благодаря такой замене уравнение (8) приводится к обыкновенному дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными. Решая его и возвращаясь к исходным обозначениям, получаем следующее выражение для смещения точек снежного покрова  $U(y)$ :

$$U_{1,2}(y) = -y + C_2 \pm \left\{ \frac{2\sqrt{B(-B + C_1 e^{yB} - 2C)}}{B^2} - \frac{2\operatorname{arctg}\left(\sqrt{B(-B + C_1 e^{yB} - 2C)}\right)}{\sqrt{B(B + 2C)}} \cdot \left(1 + 4\frac{C}{B}\right) \right\} \quad (9)$$

Знак + или – выбирается исходя из физического смысла задачи.

Граничные условия для уравнения (1):

$$\begin{cases} U(L) = 0; \\ \sigma(U(0)) = \begin{cases} \sigma_s, & F_y \geq \sigma_s \\ 0, & F_y < \sigma_s \end{cases} \end{cases}, \quad (10)$$

Где первое условие означает, что деформация на дне снежного покрова отсутствует, а второе условие показывает, что на верхней части снежного покрова задано действие постоянной силы.

Примем, что масса снега при деформации не меняется, поэтому, уплотненный объем снега  $(L - U(0)) \times b$  (см. рисунок 1) должен иметь такую же массу, как и объем до деформации  $(L \times b)$ . Отсюда следует уравнение массового баланса:

$$b \int_{U(0)}^L (A\sigma + \rho_0) dy = \rho_0 b L \quad (11)$$

Массовый баланс и граничные условия образуют систему для отыскания произвольных постоянных  $C_1$ ,  $C_2$  и коэффициента  $A$ , характеризующего зависимость плотности от напряжения.

Из граничного условия, заданного на поверхности снежного покрова, находим, что  $C_1 = F_y \sigma_s / 2$ .

Оставшиеся два уравнения имеют вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} e^{gAL} - e^{gA(C_2 \pm g\sqrt{-A^2 - 2A\rho_0})} = \frac{4\rho_0 g}{\sigma_s^2 F_y} (C_2 \pm g\sqrt{-A^2 - 2A\rho_0}), \\ -L + C_2 \pm \left[ \frac{2}{(gA)^2} \sqrt{Ag \left( -Ag + \frac{\sigma_s F_y}{2} e^{gAL} - 2\rho_0 g \right)} - \frac{2 \left( 1 + \frac{4\rho_0}{A} \right)}{g\sqrt{A^2 + 2A\rho_0}} \times \right. \\ \left. \times \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{-Ag + \frac{\sigma_s F_y}{2} e^{gAL} - 2\rho_0 g}{Ag + 2g\rho_0}} \right] = 0. \end{array} \right. \quad (12)$$

Решение уравнения осуществлялось численно для различных значений параметров  $F_y$ ,  $\sigma_s$  и  $\rho_0$ .

Как было показано выше, для решения выражения необходимо знать зависимости между осадкой и давлением на снежную поверхность. Но по мере погружения ходовой части лесовозного автопоезда в снежный покров происходит перераспределение давления в пятне контакта и опорной поверхности, что приводит к изменению несущей способности снежного покрова. На рисунке 2 представлены зависимости транспортного фактора лесовозной автомобильной дороги (деформации снежного покрова малой толщины) от величины проложенной нагрузки  $F$  для снежного покрова с различной начальной плотностью. Следует отметить, что полученное решение применимо только для условия движения лесотранспортных машин с незначительными скоростями, при отсутствии ударных, динамических воздействий на снежный покров.

На увеличение несущей способности снега оказывает влияние так же и степень приближения к жесткому основанию (покрытие лесовозной дороги).

Решение возможно провести методом подстановки (подбора), т.е. задаваясь различными значениями глубины колеи  $h_{кол}$  проводить решение до момента, при котором давление от ходовой части уравнивается силой сопротивления уплотнению снега. При решении необходимо учитывать особенности деформации снежного покрова, а так же процессы кристаллизации и рекристаллизации снега в зависимости от приложенного нормального давления.

Таким образом, задаваясь координатой текущей деформации  $U(y)$  определяем распределение давления на снежный покров под опорной поверхностью ходовой части.

На рисунке 3 представлены значения распределения нормальных напряжений по глубине снежного покрова, полученные расчетным путем, под передним пневмоколесом автопоезда Урал 43202 с рейсовой нагрузкой 87,9 кН.

Особенностью представленной математической модели является оценка в процессе решения изменение плотности снега и прочностных свойств снежного покрова (таблица 1). при многократных (последующих) приложениях внешней нагрузки.

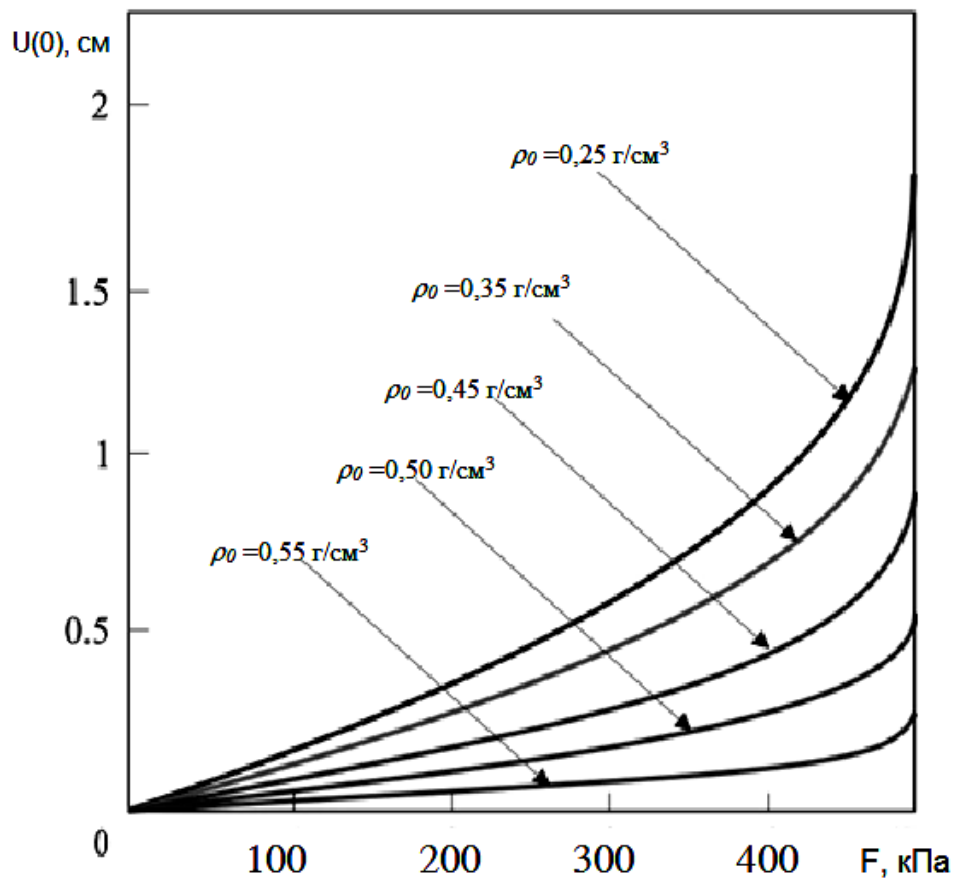


Рисунок 2 - Зависимость транспортного фактора лесовозной автомобильной дороги от величины нагрузки  $F$  для снежного покрова с различной начальной плотностью

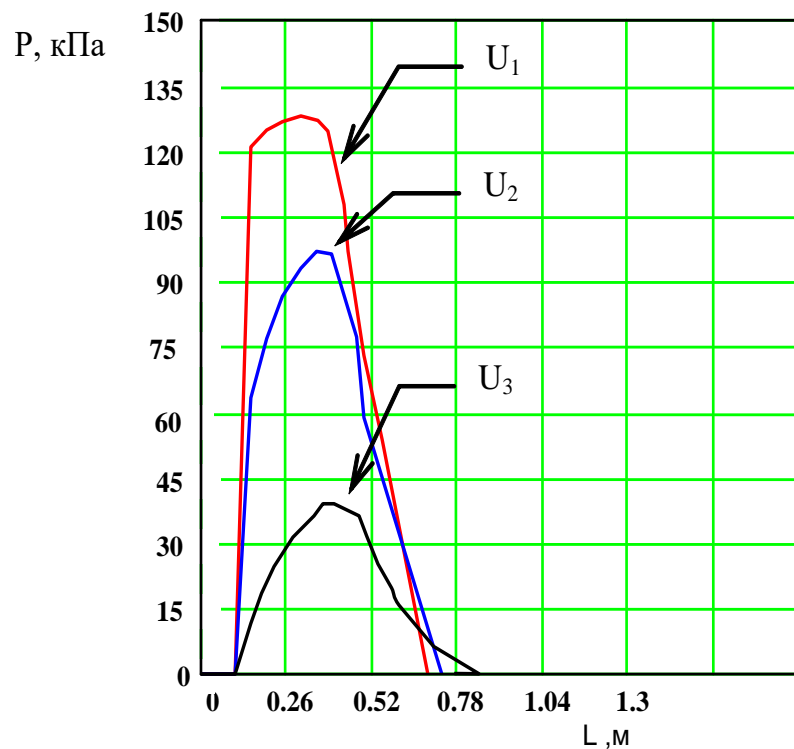


Рисунок 3 - Распределение нормальных напряжений под передним колесом автопоезда Урал 43202 с нагрузкой 87,9 кН полученных расчетным путем:  $U_1$  – на глубине 0,10 м;  $U_2$  – на глубине 0,15 м;  $U_3$  – на глубине 0,20 м

Таблица 1 - Прочностные свойства снежного покрова (по С.И. Морозову)

Тип опорной поверхности	Температура воздуха, °С	Сопротивление резанию, кН/м <sup>2</sup>	
		вертикальное	горизонтальное
Снег старый обвалованный плотностью 0,40 г/см <sup>3</sup>	До - 9	8,34	7,06
	До - 18	11,77	10,30
Снег плотностью 0,25 г/см <sup>3</sup>	До - 9	2,06	1,66
	До - 18	3,32	3,53

Решение на модели проводится численным методом с шагом квантования по времени 0,05 с. На каждом шаге проводится вычисление осадки пневмоколеса от действующего нормального давления, причем учитывается только необратимая деформация снега. На рисунке 4 представлены результаты численного моделирования изменения плотности снега на дне колеи в зависимости от числа проходов автопоезда для снежного покрова глубиной 0,25 м с начальной плотностью  $\rho = 0,21 \text{ г/см}^3$ .

Результаты моделирования движения автопоезда приведены на рисунке 5 где показано изменения сил сопротивления движения и касательной силы тяги автопоезда в зависимости от высоты снежного покрова на проезжей части при однократном проходе.

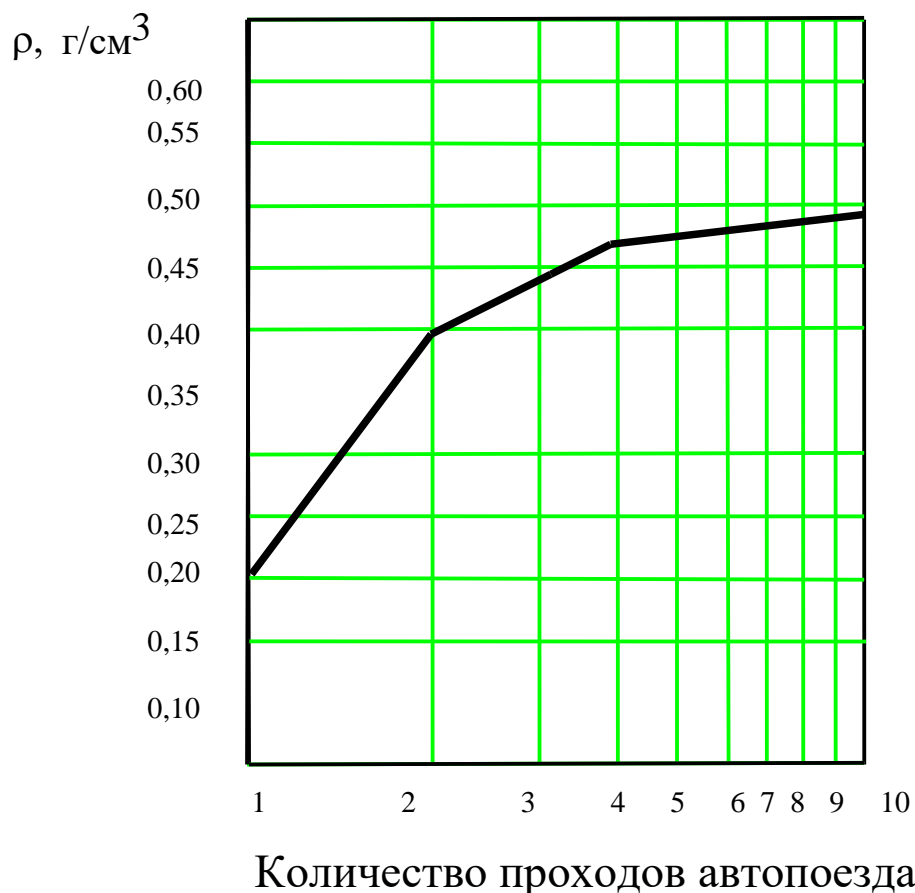


Рисунок 4 - Зависимость изменения плотности снега на покрытии от числа проходов автопоезда Урал 4320 с нагрузкой 87,9 кН

Как видно, при глубине снежного покрова от 15 до 17 см условия для перемещения лесовозных автопоездов становится небезопасным. Преодоление подобных участков становится возможным только используя динамические качества автомобилей. При глубине снежного покрова превышающего 27... 30 см передвижение автопоездов становится невозможным.





Рисунок 5 - Изменения сил сопротивления движения и касательной силы тяги автопоезда Урал 4320 с нагрузкой 87,9 кН в зависимости от высоты снежного покрова на проезжей части при однократном проходе

#### Библиографический список:

1. Афанасьев, И.А. Зимнее содержание лесовозных автомобильных дорог Уральского региона: монография / И.А. Афанасьев, И.Н. Кручинин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2006. – 135 с.
2. Васильев, А. П. Строительство и реконструкция автомобильных дорог: Справочная энциклопедия дорожника (СЭД). Т. I / А.П. Васильев [и др.]. – М.: Информавтодор, 2005. – 236 с.
3. Войтковский, К.Ф. Механические свойства снега / К.Ф. Войтковский. – М., 1977. – 158 с.
4. ВСН 137-89 Проектирование, строительство и содержание зимних автомобильных дорог в условиях Сибири и северо-востока СССР / Введ. – 1990.01.01 – М.: Транспорт, 1991. – 157 с.
5. Вуори, А.Ф. Механические свойства снега как строительного материала / А.Ф. Вуори // Физические методы исследования льда и снега: сборник трудов. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 118 с.
6. Дюнин, А.К. В царстве снега / А.К. Дюнин. – Новосибирск: Наука, 1983. – 128 с.
7. Евгеньев, И.Е. Автомобильные дороги в окружающей среде: учеб. / И.Е. Евгеньев, Б.Б. Каримов. – М.: ООО Трансдорнаука, 1997. – 285 с.
8. Кручинин, И.Н. Специализированные машины и оборудование для транспортного строительства: учеб. пособие / И.Н. Кручинин, И.И. Шомин. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т., 2011. – 184 с.
9. Кручинин, И. Н. Транспортно-производственная система лесного комплекса: монография / И.Н. Кручинин. – Екатеринбург: Урал. гос. Лесотехн. ун-т, 2010 – 155 с.

**Аннотация.** В статье рассматриваются проблемы озеленения городских территорий с применением деревьев хвойных пород. Приводится ассортимент хвойных деревьев применяемых в озеленении, рекомендации к посадке, выращиванию и уходу в условиях Европейского севера.

**Ключевые слова:** деревья хвойных пород, работы по озеленению городских территорий, антропогенное воздействие.

Хвойные растения занимают достойное место в озеленении городских территорий. Причин повышенного интереса к посадкам вечнозеленых растений довольно много. И, пожалуй, на первом месте будет именно то что они круглый год зеленые. В нашей полосе полгода зима и унылый пейзаж скрашивает зелень хвойных растений. Поэтому горожане так любят прогулки в парках, где преобладают посадки сосен и елей, полезно и приятно подышать чистым воздухом и зарядится позитивом.

Но важность хвойных пород не только в повышении эмоционального состояния жителей, значительное и неоспоримое улучшение окружающей среды за счет круглогодичного выделения кислорода, насыщение и очищение городского воздуха выделяемыми фитонцидами. Тем более что период анабиоза в зимний период у хвойных минимален, а значит и работают они практически постоянно.

Благодаря плотной кроне хвойным деревьям нет равных в выполнении ветро- и шумо защитных функций для городской среды. Немаловажна и экономия городского бюджета на вывоз и уборку опавшей листвы. Ассортимент хвойных деревьев и кустарников не ограничивается Сосной обыкновенной и Елью обыкновенной. На улицах города прекрасно приживаются Ель сербская, Ель колючая, Пихта одноцветная и сибирская, Сосна кедровая, Сосна черная.

Разнообразные оттенки и структура хвои позволяют создавать приятные глазу и достаточно функциональные групповые посадки [1].

- Так Сосны, посаженные вдоль магистралей прекрасно защищают жилой массив от производимого дорогой шума, поглощая не мене 30%. Ели обыкновенные и сербские, Пихта сибирская способствуют защите от пыли и ветра. В лечебных и детских учреждениях часто можно увидеть Пихту корейскую и Пихту одноцветную выделяемые этими деревьями фитонциды работают как естественный природный дезинфектор, очищают воздух, насыщая его полезными для дыхания веществами.

- На бульварах, в городских скверах, у муниципальных учреждений традиционно можно увидеть групповые посадки Ели колючей. Ее насыщенного голубого цвета хвоя выглядит благородно и нарядно. И если Ели украшали наши скверы всегда, то в последнее время стали популярны композиции с включением хвойных кустарников. Особым спросом пользуются различные сорта Сосен горных и Можжевельников. Так для небольших композиций хорошо подойдут Сосны горные «Пумилио», «Гном», карликовая форма Сосны обыкновенной «Ватерерри», Можжевельники виргинский «Грей Оул», средний «Минт Джулеп», различные карликовые формы Туи западной «Вудварди», «Даника», медленно растущие сорта Пихты корейской «Сильберлог».

- Для масштабных пейзажных композиций в парках используются монопосадки быстро растущих сортов Можжевельника казацкого «Маас», «Глаука». Так же для создания композиций в естественном стиле хорошо подойдет Сосна горная «Мугус».

Если крупные хвойные деревья помимо красоты несут все же серьезную функциональную нагрузку, то создание композиций из карликовых растений несет скорее эмоциональную. Созерцание удачно подобранных по цвету и фактуре мелких хвойных успокаивает нервную систему, а приятный тонкий аромат эфирных масел принесет пользу здоровью.

Сложность проведения работ по озеленению в городах Европейского Севера связана с объективными причинами. Во-первых, регион характеризуется суровыми природными условиями. Во-вторых, опыт озеленения данного региона слабо изучен, что проявляется в отсутствии обоснованного современного регионального районирования для целей озеленения ассортимента как древесно-кустарниковых, так и травянистых видов, разработанной агротехники озеленительных работ. В-третьих, в городах не разработаны долгосрочные программы и перспективные планы озеленения, не обоснованы в достаточном объеме практические рекомендации. Все это усугубляется большим дефицитом квалифицированных специалистов в городском зеленом хозяйстве – ландшафтников-озеленителей, без которых невозможно повысить эффективность ландшафтного строительства. Исследования выполнены с целью анализа состояния городского озеленения и научного обоснования направлений его улучшения [1].

Например, для Сыктывкара отмечается значительное отставание темпов озеленения от темпов строительства города. Для города характерен низкий художественно-архитектурный уровень планировки зелёных насаждений и недостаточное использование интродуцированных древесных растений. Большую роль в обогащении культурной флоры новыми видами играет ботанический сад Института биологии Коми НЦ УрО РАН. Отмечается уникальная ценность в старых насаждениях города липы мелколистной, которая является редким и охраняемым видом южных лесов Республики Коми. Позднее в посадку был введён единственный вид инорайонного происхождения - тополь бальзамический [2].

Для рационального озеленения арктических городов необходимо:

- использовать местные и интродуцированные хвойные и лиственные деревья, постепенно расширяя ассортимент зелёных насаждений;

- осуществлять верный подбор и подготовка посадочного материала к выращиванию в северных условиях. Для озеленения необходимо использование адаптированного посадочного материала из районов, расположенных в подобных экологических условиях. Так, например, для посадки используются саженцы деревьев и кустарников с закрытой корневой системой, наибольшей приживаемостью характеризуются растения, полученные из суровых условий ареала вида и более северных питомников. При транспортировке растений необходимо использовать гидрогель, сохраняющий почву во влажном состоянии, обеспечивающий корневое питание растений влагой [2];

- учитывать экологические особенности растений при выборе места под посадку. Например, для некоторых хвойных растений (пихта, ель, кедр) при посадке в летний период, а также в весеннее время требуется затемнение. В качестве затемнения можно использовать северные стороны зданий, группы рядом растущих растений, временные щиты [2];

- осуществлять должный уход за саженцами. Перед посадкой деревьев и кустарников необходимо хорошо полить водой как сами растения (за несколько часов до посадки), так и посадочное место. После посадки необходим полив растений. Основную часть растений следует вносить в весенний период, также можно вносить препараты, действия которых направлено на рост корней. Со второй половины лета азотные удобрения не вносятся, так как растениям необходимо готовиться к зимнему периоду. Для успешной приживаемости саженцев необходим уход в виде полива, удаления сорняков, рыхления и внесения удобрений. Не только хвойные, но и лиственные деревья и кустарники в конце зимы и начале лета, когда устанавливаются положительные температуры, нуждаются в рассеянной скользящей тени. Температурные перепады в течение суток и жаркий солнечный свет, усиленный снеговым отражением, - основные причины повреждения обжигающим ультрафиолетом растительных частей кустарников и деревьев, обращённых к солнцу [2].

Следует отметить, что на Крайнем Севере естественные древесно-кустарниковые массивы и травяной покров очень «хрупкие» из-за тонкого слоя почвы и неглубокого залегания корней растений. Для деревьев, включённых в городскую застройку, особенно ставших крайними в массивах, резко меняются радиационный, температурный и влажностный режимы, что пагубно воздействует на их экологическое состояние. Поэтому следует проводить специальные мероприятия по охране существующих зелёных насаждений и прежде

всего - по сохранению максимально крупных зелёных массивов. Одновременно требуется предусматривать постепенную замену деревьев и кустарников породами, более устойчивыми к городской среде. Растения должны создавать иллюзию интенсивного озеленения города за счёт размещения участков зелёных насаждений в местах основных пешеходных коммуникаций и визуального раскрытия города в сторону естественных зелёных массивов.

Хвойные виды имеют целый ряд полезных эколого-биохимических особенностей, которые делают их незаменимыми и особо ценными при озеленении городов. Они способны поглощать и утилизировать токсические газы в сравнительно больших количествах, а также выделять кислород и фитонциды. Усиление рекреационной нагрузки сказывается на состоянии растений, что представляет угрозу для пригородных и городских насаждений [3].

Несмотря на то, что хвойные породы проявляют слабую газоустойчивость, их вклад в оптимизацию атмосферы весьма значителен. На 1 т фитомассы хвойные выделяют кислорода на 12%, а поглощают углекислого газа на 20% больше, чем лиственные породы. Кроме того, хвойные могут выполнять роль биологических фильтров, очищая атмосферный воздух от промышленных токсикантов. Эти свойства особенно важно учитывать при подборе древесных пород для озеленения в местах со значительным загрязнением атмосферы [3].

В настоящее время установлено, что на атмосферное загрязнение воздуха более остро реагируют хвойные породы, по сравнению с лиственными. Повышенная чувствительность хвойных связана с длительным сроком жизни хвои (у сосны вместо пяти лет хвоя живет всего 1-2 года, а у ели вместо семи лет - 1-3 года) и поглощением газов, а также снижением массы хвои (дефолиация, ожог, уменьшение длины). Наблюдения показывают, что при частых или постоянных воздействиях в тканях растений постепенно накапливаются токсичные соединения. Вещества, накапливающиеся в течение первых двух лет, приводят к отмиранию хвои. Остающаяся на дереве одно- и двухлетняя хвоя не способна обеспечить нормальный рост и развитие дерева, т.к. первая начинает нормально функционировать лишь в середине лета, а вторая уже значительно ослаблена накопленными токсическими веществами. Листопадные породы в этих условиях не гибнут, поскольку ежегодно обновляют листья и тем самым освобождаются от вредных соединений [4].

Повреждения хвойных деревьев сводятся, главным образом, к следующим симптомам: изменение окраски хвои (в том числе хлороз), точечные и апикальные некрозы хвои, уменьшение продолжительности жизни хвои, увеличение числа хвоинок на побеге, изменение размеров отдельных органов, изреживание кроны, снижение линейного прироста оси ствола и ветвей, нарушение распределения фитомассы хвои по высоте кроны, изменение габитуса молодых деревьев, гибель деревьев.

Хвойные насаждения в районе агломерации играют огромную роль в решении экологических проблем, выполняя средообразующие, средозащитные, санитарно-гигиенические и рекреационные функции, а также способствуют сохранению разнообразия травянистых и кустарниковых растений в лесных массивах.

Для сохранения и повышения жизнеустойчивости городских насаждений необходимо вводить в состав древостоя газоустойчивые виды.

Для повышения устойчивости пригородных насаждений рекомендуем постепенное формирование смешанных насаждений с сохранением березы, осины, клена. Для формирования нижнего яруса древостоя и подлеска, что создает благоприятные условия для орнитофауны и энтомофагов, следует рекомендовать введение рябины, черемухи, калины, жимолости, спиреи и других кустарников.

Самыми чувствительными видами среди хвойных видов являются пихта сибирская и ель сибирская. Поэтому их посадки следует планировать вдали от источников загрязнения (автодорог, котельных). В парках и скверах эти виды весьма декоративны.

Для создания условий нормального роста и развития хвойных видов в городе должны быть выработаны мероприятия, которые уменьшили бы загрязнение воздуха и содержание в нем токсических веществ, пыли, сажи (применение газо-пылеуловительных установок, выбор топлива и технологии его сжигания, гарантирующие наименьшее выделение при сжигании сернистого газа).

### **Библиографический список:**

1. Интродуценты в зелёном строительстве северных городов: монография / Н.А. Бабич, О.С. Заславская, Г.И. Травникова. - Архангельск: Арханг. гос. ун-т., 2008. 144 с.
2. Бабурин В.Л., Бадина С.В., Горячко М.Д., Земцов С.П. Природные факторы развития урбанизированных пространств Арктической зоны России // Вопросы географии /Сб. 142: География полярных регионов / Отв. ред. В.М. Котляков. - М.: Издательский дом «Кодекс», 2016. С. 47- 56.
3. Чернышенко О.В. Поглощительная способность и газоустойчивость древесных растений в условиях города. - М.: МГУЛ, 2001. - 120 с.
4. Рябинин В.М. Лес и промышленные газы.- М.: Лесн. пром-сть, 1965.- 93 с.

УДК 630\*377.4

### **Оценка воздействия ходовой части лесных машин на почву**

Черевань В. С.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** Новые решения для лесозаготовительных машин должны быть менее вредоносными по отношению к почве, чем современные машины, тем меньше вреда они приносят почве. Чтобы иметь возможность разработать лесозаготовительную машину, которая сохраняет рельеф местности, требуется правильное понимание взаимодействия между шиной и почвой. Цель этого исследования состояла в том, чтобы дополнить существующие знания о взаимодействии шин лесных машин с почвой. Представлена технология WES с целью определения взаимодействия почвы и ходовой части техники.

**Ключевые слова:** лесозаготовительные машины, повреждение почвы, моделирование, WES, индекс конусности.

Наиболее распространенным методом заготовки леса в России является метод обрезки по длине. Он основан на применении двух машин: харвестере, который валит деревья и обрезает их на заданную длину, и форвардере, который транспортирует бревна на посадочную площадку для дальнейшей транспортировки на перерабатывающее предприятие. За последние годы конструкция лесозаготовительных машин значительно улучшилась. Исследования и разработки в области внедорожных транспортных средств были успешно применены в процессе разработки нового поколения лесозаготовительных машин.

Лесная почва очень сложна и чувствительна, и она имеет очень мало сходства с типичными сельскохозяйственными почвами. Она состоит из больших участков песка и глины с вкрапленными камнями различных размеров и несколькими корневыми слоями, которые значительно повышают несущую способность. Большие площади также представляют собой болотистую местность с очень низкой несущей способностью. Кроме того, при прореживании, учитывая скорость роста деревьев, корневые слои также должны быть защищены от разрушения. Колесные транспортные средства, как правило, более маневренные, чем гусеничные, но недостатком является то, что они создают более высокое давление на грунт и, следовательно, большую колею, что приводит к большему повреждению корней. Следовательно, анализ несущей способности грунтов и подвижности транспортных средств требует надлежащих методов моделирования взаимодействия лесной техники с рельефом местности.

Взаимодействие транспортного средства с рельефом охватывает такие вопросы, как трение шин о грунт, образование колеи, уплотнение грунта, сцепление с дорогой и сопротивление качению. Глубина колеи от колес является одним из ключевых факторов, определяющих характеристики транспортного средства и энергопотребление, а также ущерб, наносимый почве и растительности. Измерение и характеристика механических свойств многослойного грунта, которые могут эффективно использоваться для прогнозирования подвижности, является сложной задачей. Двумя преобладающими

методами определения механических свойств грунта являются конусный пенетромтр и методы измерения скоса. Метод измерения параметров сравнительно менее эффективен для характеристики неоднородных почв, таких как типичные почвы лесного хозяйства Северной Европы. Широко используемый WES-метод представляет собой набор полуэмпирических методов, основанных на данных конусного пенетромметра для описания механических свойств грунта, моделирования взаимодействия колеса с грунтом и прогнозирования мобильности и проходимости.

Индекс конусности - это механическое свойство грунта, которое широко используется для оценки прочности грунта при проектировании внедорожных транспортных средств. Индекс конусности успешно использовался экспериментальной станцией инженерных систем (WES) в качестве показателя прочности грунта для установления эмпирических соотношений грунт-транспортное средство для прогнозирования характеристик наземных транспортных средств. Индекс конусности - это показатель сопротивления грунта проникновению прямоугольного конуса. Индекс конусности измеряется в силе на единицу площади. Последние разработки в области аналитического моделирования характеристик транспортных средств требуют, чтобы грунт можно было описать в терминах его фундаментальных свойств, таких как угол внутреннего трения, сцепление, жесткость, плотность и т.д. Чтобы использовать большую базу данных индекса конусности и установить соответствие между эмпирическими исследованиями и теоретическими моделями мобильности, было необходимо соотнести индекс конусности с инженерными свойствами почвы [2].

Несущая способность грунта - это способность грунта безопасно выдерживать давление, оказываемое на грунт любыми транспортными средствами. Несущая способность грунта напрямую связана с сопротивлением проникновению грунта в WES-методе. Таким образом, индекс конусности грунта можно рассматривать как показатель его несущей способности.

В грунтостроении просадка основания (колеса или гусеницы) используется в качестве выходной переменной, и разрабатываются различные модели несущей способности грунта с использованием различных параметров грунта в качестве входных переменных [4]. Основной причиной уплотнения грунта является просадка грунта, вызванная колесом или гусеницей. Таким образом, прогнозирование просадки грунта невероятно важно для определения уровня уплотнения грунта. В течение последних пяти десятилетий прогнозирование просадки почвы представляло большой интерес для сельского хозяйства, а также для исследователей мобильности по пересеченной местности.

Текстура почвы является характерным параметром почвы, который определяет управление лесными полями. Класс текстуры почвы определяется процентным содержанием песка, ила и глины. Почвы можно разделить на четыре различных класса по текстуре: песок, ил, суглинок и глина.

Типичная лесная почва покрыта слоем гумуса толщиной 3-10 см. Почва часто представляет собой ледниковые отложения. Наиболее распространенной является песчаная почва, которая более или менее похожа на хорошо просеянный суглинистый песок. Валунны встречаются довольно часто. Поскольку климат здесь влажный и довольно холодный, почва часто бывает довольно влажной. Песчаная почва с гравием и валунами, слой гумуса, корни деревьев и наземной растительности, скорее всего, являются основными компонентами, определяющими прочность лесной подстилки [6]. Прочность почвы в значительной степени зависит от ее структуры и содержания воды. Как правило, прочность почвы снижается по мере того, как текстура почвы становится более тонкой. Грунты с низкой прочностью более восприимчивы к уплотнению и связанным с ним нарушениям.

Колееобразование лесных почв определяется как разрушение структуры почвы, вызванное деформацией поверхности почвы. Образование колеи в почве происходит, когда давление, оказываемое на влажную почву сверху вниз, превышает ее прочность на сдвиг и приводит к разрушению. По мере того, как содержание воды в почве приближается к насыщению, совместимость снижается, поскольку воздушные пространства заполняются водой, но вероятность образования колеи возрастает. В общем случае образование колеи

сопровождается уплотнением, например, по бокам и на дне колеи, но на очень влажных или перенасыщенных почвах образование колеи может происходить и без уплотнения [1]. Образование колеи не обязательно увеличивает насыпную плотность, поскольку влажная почва имеет низкую пористость, заполненную воздухом. Образование колеи может повлиять на перемешивание почвы, уменьшить пористость, толщину слоя корневой подстилки, а также может привести к повреждению корней.

Типичная лесная почва состоит из большого количества корней, которые погребены в несколько относительно тонких слоев. Согласно Вестерлунду, большинство корней находится на поверхности 1 м почвы, причем большинство мелких недревесных корней находится в верхних 10 см почвы [6]. На квадратный метр может приходиться до 300-500 корней. Распределение корней и закономерности роста, по-видимому, чрезвычайно разнообразны как у одного и того же вида (например, в разных условиях окружающей среды), так и между разными видами, причем у некоторых по мере развития меняется архитектура.

**WES-метод.** При использовании этого метода транспортные средства тестируются на различных участках местности, и в то же время местность определяется с помощью полевых наблюдений и упрощенных измерений. Затем значения параметров эмпирической модели адаптируются для соответствия полевым испытаниям. Исходя из этого, модель может быть использована для разработки шкалы оценки проходимости местности и мобильности транспортных средств. Недавно этот подход был расширен, например, для эмпирической корреляции определенных безразмерных эксплуатационных параметров шин с числовыми показателями подвижности, основанными на индексе конуса [5].

Модель индекса конусности транспортного средства WES (VCI) - это эмпирическая модель для прогнозирования характеристик транспортного средства на мелкозернистых неорганических почвах. Он включает в себя определение минимальных требований к прочности грунта с точки зрения индекса конусности транспортного средства, максимального тягового усилия и сопротивления движению буксируемого транспортного средства при движении по прямой линии с постоянной скоростью по беспрепятственной ровной и наклонной поверхности грунта. Все рабочие параметры связаны с рейтинговым индексом конусности для мелкозернистых почв и индексом конусности для крупнозернистых почв. Числовая модель мобильности WES также является по существу эмпирической и в настоящее время применима к транспортным средствам с пневматическим приводом. Числовая модель мобильности основана на обобщении систематических испытаний одного колеса на подготовленных однородных грунтах [3].

Важными факторами, влияющими на тяговое усилие транспортного средства и сопротивление качению, являются механические свойства грунта, размер шин и давление в шинах, динамическая нагрузка на колеса и проскальзывание колес. Многие исследователи исследовали эти факторы и предложили уравнения прогнозирования тяги для различных полевых условий и эксплуатации. Многие авторы разработали адаптированные модели для прогнозирования мобильности, основанные на WES-методе.

WES-метод не был разработан с целью прогнозирования оценки нарушения почвенного покрова или других воздействий тракторов повышенной проходимости на окружающую среду, но он может быть расширен для оценки просадки колес, образования колеи и уплотнения почвы [4].

#### **Заключение.**

Модели с измененными параметрами позволяют лучше оценить значения глубины колеи, связанные с аналогичными типами машин и грунтом. Исходя из исходных моделей, расчетные значения с использованием метода имеют близкое сходство с данными о глубине колеи при первом прохождении колесом. Модель может быть использована для оценки глубины многопроходных колеи.

Различные модели контактного давления давали разные уровни давления, указывающие на то, что требуется большое количество тестовых данных, чтобы сделать вывод о том, какая модель наиболее полезна для применения в лесном хозяйстве.

Предложенная модель показывают, что хорошая оценка несущей способности возможна с помощью аналитических моделей. Правильный выбор значений параметров оказывает большое влияние на результаты. Модель должна быть проверены с помощью полевых испытаний, лабораторных тестов и имитационного моделирования. Механизм разрушения корневой системы при нагрузке на колесо должен быть дополнительно изучен.

**Библиографический список:**

1. Arnup, R.W., 1998: The extent, effects and management of forestry-related soil disturbance, with reference to implications for the clay belt: a literature review. OMNR, Northeast Science & Technology. TR-037. 1998. 30 p.
2. Behzad, R., George, Y.B., 1981: Correlation of mobility cone index with fundamental engineering properties of soil. Structures Laboratory. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Vicksburg, MS
3. Rula, A., Nuttall, C., 1971: An Analysis of Ground Mobility Models (ANAMOB). Technical Report M- 71-4, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
4. Saarilahti, M., 2002: Soil interaction model. Project deliverable D2 (Work package No. 1) of the Development of a Protocol for Eco-efficient Wood Harvesting on Sensitive Sites (ECOWOOD). EU 5th Framework Project (Quality of Life and Management of Living Resources) Contract No. QLK5-1999-00991 (1999-2002).
5. Wong, J.Y., 2008: Theory of ground vehicles. Fourth edition, John Wiley & Sons, New Jersey
6. Wästerlund, I., 1989: Strength components in the forest floor restricting maximum tolerable machineforests, Journal of terramechanics 26 (2), 177-182



## СЕКЦИЯ 5. АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 697.921.2

### **Особенности размещения аэрационных проемов и их влияние на формирование тепловоздушной среды в помещении со значительными тепловыделениями**

Булгаков В. Ю., Пухкал В. А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Для вентиляции производственных помещений со значительными тепловыделениями предусматривается аэрация (организованный естественный воздухообмен). На состояние микроклимата в рабочей зоне (температуру и скорость движения воздуха) основное влияние оказывает расположение приточных и вытяжных отверстий. Управлять состоянием микроклимата возможно открытием/закрытием приточных аэрационных проемов в верхней и нижней зоне помещения.

Представленная работа направлена на выявление влияния размещения приточных аэрационных проемов на формирование тепловоздушных потоков в помещении. Приведены данные натурных измерений и результаты моделирования.

**Ключевые слова:** аэрация, производственные здания, значительные тепловыделения, микроклимат.

Расположение приточных аэрационных проемов является определяющим фактором при формировании параметров воздушной среды в рабочей зоне производственных помещений со значительными тепловыделениями [1-3].

Выполнены исследования различных вариантов работы приточных аэрационных проемов (на нижнем ярусе – в теплый период года; верхнем ярусе – в холодный период года) при удалении воздуха через аэрационный фонарь и механической вытяжной системой вентиляции в котельном отделении главного корпуса Автовской ТЭЦ (ТЭЦ-15, Санкт-Петербург).

Выполнены натурные замеры температуры уходящего воздуха в рабочем сечении вентиляционного фонаря, температуры внутреннего воздуха в диапазоне высот от 20 до 39 м, температуры воздуха в рабочей зоне помещения при температуре наружного воздуха 14 °С.

В процессе исследований поочередно открывались приточные аэрационные проемы сначала в верхней, а затем в нижней зоне помещения.

Данные измерений позволяют сделать следующие выводы:

- открытие приточных аэрационных проемов в верхней зоне помещения незначительно, но сказывается на повышении температуры воздуха в рабочей зоне. Открытие приточных аэрационных проемов в нижней зоне существенно сказывается на температуре воздуха в рабочей зоне;

- при открытии приточных аэрационных проемов в верхней зоне помещения наблюдается повышение, а при закрытии (и, соответственно, открытии проемов в нижней зоне) наблюдается понижение температуры уходящего воздуха;

- при переходе на работу только верхних аэрационных проемов уменьшается гравитационный напор, что вызывает снижение аэрационного воздухообмена в помещении и приводит к повышению температуры уходящего воздуха и воздуха в рабочей зоне. Обратная картина наблюдается при переходе на работу только нижних аэрационных проемов.

Для качественного представления распределения температуры внутреннего воздуха при разных условиях подачи приточного воздуха в помещении котельного отделения выполнено компьютерное моделирование в программе ANSYS Fluent 19.2 (рис. 1).

В модели установлено пять энергетических котлов. Из них в рабочем состоянии два котла (К2, К4). В модели не учитывается наличие внутренних конструкций, трубопроводов и вспомогательного оборудования.

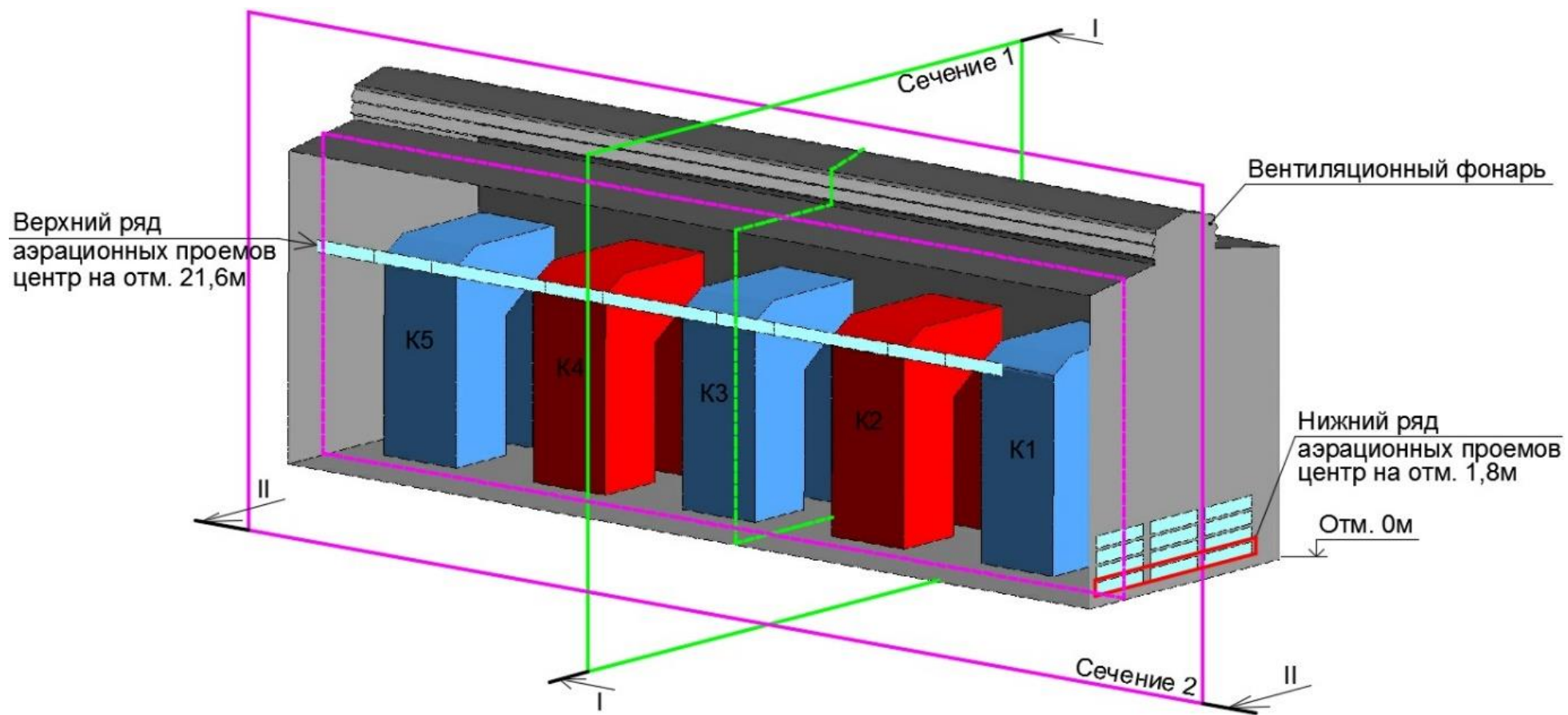


Рисунок 1 - Схема моделируемого помещения

Моделирование выполнено для случаев подачи наружного воздуха через аэрационные проемы, расположенных в нижней и верхней зонах помещения. При этом отдельно рассмотрены варианты, когда открыт/закрыт аэрационный проем напротив прохода свободного от оборудования. Расчет произведен для наружных температур: 0 °С, 14 °С, 22 °С.

При моделировании были заданы следующие условия:

- поверхность котла абсолютно ровная;
- тепловыделения распределены равномерно по поверхности котла;
- для одного котла приняты тепловыделения: 600 Вт/м<sup>2</sup>;
- не учитывается инфильтрация воздуха в помещении;
- не рассматривается влияние ветра на наружные поверхности здания;
- воздух поступает и удаляется из помещения по нормали к граничным поверхностям.

Пример распределения температуры внутреннего воздуха по сечению 2 при температуре наружного воздуха 14 °С приведен на рис. 2.

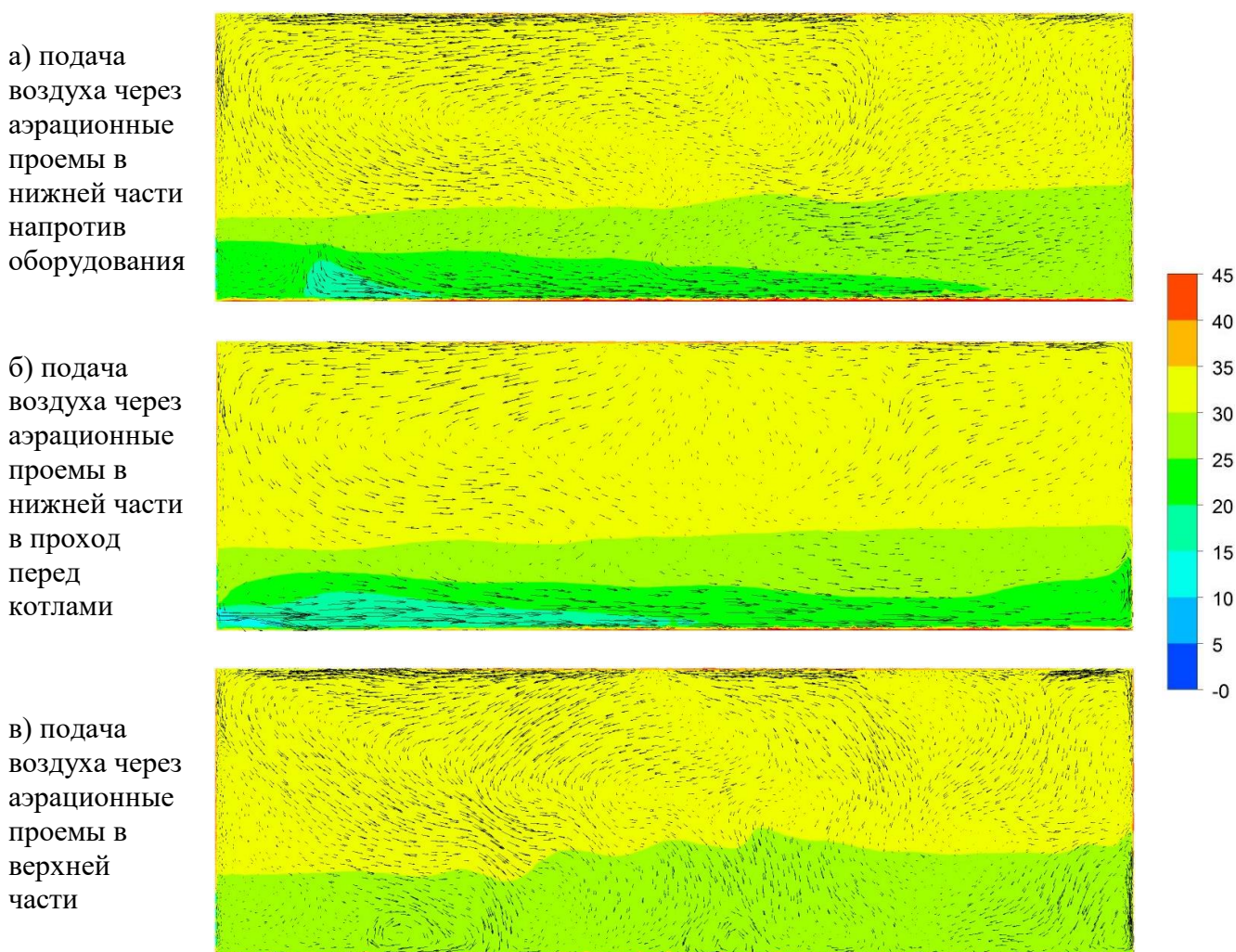


Рисунок 2 - Распределение температуры внутреннего воздуха по сечению 2 при температуре наружного воздуха 14 °С

Результаты моделирования подтвердили данные натурных измерений. В реальных условиях эксплуатации на температуру воздуха в рабочей зоне дополнительное влияние оказывает расположение основного и вспомогательного оборудования; расположение площадок обслуживания и др. Наличие площадок обслуживания в верхней зоне помещения может отклонить ниспадающие потоки от аэрационных проемов.

#### Библиографический список:

1. Пухкал, В. А. Размещение приточных аэрационных проемов в помещениях со значительными тепловыделениями / В. А. Пухкал, В. Ю. Булгаков // Вестник Евразийской

науки. - 2021. - Т 13. - №3. - URL: <https://esj.today/PDF/12SAVN321.pdf> (дата обращения: 01.06.2023).

2. Гримитлин, А.М. Отопление и вентиляция производственных помещений / А. М. Гримитлин, Т. А. Дацюк, Г. Я. Крупкин, А. С. Стронгин, Е. О. Шилькрот. – Санкт-Петербург: Издательство «АВОК Северо-Запад, 2007. - 400 с.

3. Шилькрот, Е.О. К расчету аэрации главных корпусов тепловых электростанций / Е. О. Шилькрот, В. Ю. Проскуровский // Труды Теплопроекта. Проектирование тепловых и атомных станций. 1977, Вып. 19. - С. 139-150.

УДК 621

## Положительные факторы использования КДО в малой теплоэнергетике

Иванова Е. С.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье рассматриваются положительные факторы использования кородревесных отходов (КДО) в качестве биотоплива в малой теплоэнергетике.

Дается краткая характеристика кородревесных отходов в зависимости от вида древесины, ее влажности. Приведены разные способы сжигания КДО и вывод по эффективности использования

**Ключевые слова:** биотопливо, кородревесные отходы, пеллеты, топливные брикеты, малая теплоэнергетика.

Россия планирует нарастить долю возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе страны с текущих 2,2 до 6% к 2035 году и до 15% к 2050 году. [1]

Республика Коми одна из первых, среди территорий с лесной и деревообрабатывающей промышленностью, стала перерабатывать отходы деревообработки в «евродрова» (пеллеты и брикеты). Сегодня в республике работают восемь предприятий, выпускающих данный вид продукции.

До санкционного периода такой вид биотоплива как древесные пеллеты закупался почти полностью западными странами. Что составляло более 90 тыс. тонн в год. Санкции привели к тому, что спрос на данную продукцию в последний год резко упал. По оценке Росстата в 2022 году российские пеллетчики выпустили на 20% продукции меньше, чем в 2021. Самое большое падение произошло у нас в Северо-Западном федеральном округе – на 32%, до 789,1 тыс. тонн.

Наряду с этим к 2022 году объёмы производства брикетов в Коми достигли 25 тыс. тонн в год. Одновременно с развитием производства данного вида топлива в регионе уделили немало внимания и повышению спроса на него. Минстрой Коми совместно с Минэкономразвития и ресурсоснабжающими организациями ведёт работу по переводу муниципальных котельных на древесные брикеты.

Соответствующая программа включена в антикризисный региональный план мероприятий по обеспечению устойчивого развития экономики Республики Коми в условиях внешнего санкционного давления. По оценке специалистов, потенциальный объём потребления брикетов в регионе — более 56 тыс. т в год. В связи с этим количество предприятий производящих брикеты должно увеличиться в два раза. Сейчас топливные брикеты выпускают три предприятия (ООО «ТБ Усть-Кулом», ООО «СевЛесПил» Сыктывкар, ООО «Азимут» Троицко-Печорск).

Предварительно предполагалось, что полный перевод всех региональных котельных с мазута и угля на биотопливо в Коми случится к 2023 году, но осенью 2022 года наметился обратный процесс, котельные начали вновь использовать уголь, поскольку цена на брикеты выросла, и их использование стало не выгодным.

3 марта 2023 года в регионе прошло совещание, на котором местные власти и предприниматели обсудили вопрос заключения долгосрочных договоров на поставку

биотоплива и реализацию пилотного проекта по замене устаревших котлов на новые автоматические установки, работающие на биотопливе. Для модернизации и строительства новых котельных планируется привлечь средства из федерального бюджета, соответствующую заявку поручено подготовить Минстрою Республики Коми совместно с АО «Коми тепловая компания». На данный момент в Республике Коми насчитывается 161 твердотопливная котельная, 103 работают на угле, а 58 – на биотопливе. К 2024 году планируется эксплуатировать 104 котельные на биотопливе. Для этого понадобится оценочно 50 тыс. т брикетов в год. [2]

Производство гранул и брикетов целесообразно открывать в непосредственной близости от зоны заготовки и переработки древесины в примерных объемах от 30 до 210 тыс. м<sup>3</sup> в год.

Наряду с этим в республике много мелких производств у которых также скапливается довольно большое количество древесных отходов, которые могут быть использованы в качестве топлива. Доля энергетических затрат в структуре себестоимости продукции деревообрабатывающих предприятий достигает 20-30%, что говорит о высокой энергоемкости производства. В этой связи энергетическое использование древесных отходов, на данных предприятиях, повысит эффективность производства, улучшится экологическая составляющая районов.

Рассмотрим факторы определяющие эффективность использования кородревесных отходов (КДО) в малой теплоэнергетике: минимальное присутствие серы, небольшая зольность, малая стоимость в сравнении с другими видами органического топлива.

При оценке коры как топлива различают высшую теплоту сгорания коры и низшую теплоту сгорания, зависящую от элементарного состава рабочей массы коры.

В высшей теплоте сгорания учитывается все то тепло, которое выделяет единица массы коры при ее сжигании, включая тепло, расходуемое на испарение содержащейся в ней влаги.

Низшая теплота сгорания равна теплу, выделяющемуся при сгорании за вычетом количества тепла, расходуемого на испарение содержащейся в коре влаги, а также образовавшегося при сжигании водорода.

Низшая теплота сгорания в основном зависит от содержания в коре влаги. При возрастании влажности происходит пропорциональное уменьшение ее теплотворной способности практически до «нуля».

Высшая теплота сгорания древесной коры самых распространенных в деревообработке пород: ель – 20,0 МДж/кг., сосна – 21,9 МДж/кг., береза – 23,5 МДж/кг., осина – 20,0 МДж/кг.

Таблица 1.1 - Низшая теплота сгорания коры с учетом влажности

	10%		50%		70%		80%	
	МДж/кг	кВтч/кг	МДж/кг	кВтч/кг.	МДж/кг	кВтч/кг	МДж/кг	кВтч/кг
Ель	16,7	4,64	8,0	2,23	3,7	1,10	1,5	0,43
Сосна	18,5	5,15	8,9	2,47	4,1	1,13	1,7	0,47
Береза	19,1	5,29	9,2	2,56	4,3	1,19	1,8	0,50

Согласно приведенной выше таблице эффективная теплотворная способность является своеобразной характеристикой коры как топлива.

Эффективная теплотворная способность коры резко снижается при влажности более 50%, что ясно видно из приведенной таблицы. При влажности коры более 65-68% пламя в топке гаснет вовсе. Чтобы предотвратить данную ситуацию, топливо подсушивают; и (или), при невозможности сушки, подогревают дутьевой воздух, подаваемый на горение.

Элементарный состав коры и теплота сгорания являются важнейшими показателями, характеризующими кору с позиции использования в качестве топлива. Горючая масса коры

представляет собой комплекс сложных органических соединений, в состав которых входят следующие компоненты: углерод, водород, кислород, азот, сера, зола.

Таблица 1.2 - Состав горючей массы коры древесины в расчете на абсолютно сухие вещества (а.с.) горючую массу, %

	H	C	O+N	S	A	кол-во лет. вещ.
Ель	5,4	51	40,7	0,04	2,6	72,5
Сосна	7,5	53,4	39,2	0,03	1,3	80
Береза	7,5	59,2	32	0,03	1,7	77
Осина	6,0	51,3	40	0,05	2,5	65

Как видно из приведенной таблицы, горючая масса, свежей коры представляет собой высокореактивное топливо со сравнительно высоким выходом летучих веществ и небольшой зольностью. Зола в коре является балластом, несколько снижающим теплоту сгорания топлива. Но чем выше выход летучих, тем ниже температура воспламенения топлива и следовательно быстрее происходит возгорание и горение при более низких температурах, что уменьшает выход оксидов азота.

Таблица 1.3 - Основные химические элементы, входящие в состав золы коры, %

	Na	Mg	Al	Zn	P	K	Fe	Mn
Ель	1,2	1,9	1,4	0,2	11,5	1,2	1,7	5,8
Сосна	2,2	3,6	6,0	0,3	13,8	4,4	1,7	10,8

Таблица 1.4 - Основные компоненты золы, %

Оксид кальция (30-33%)	Оксид алюминия (3-3,5%)
Диоксид кремния (30-32%)	Оксид магния – (2,5-3%)
Оксид железа (11-12%)	Зольные вещества (2,2%)

Наличие в золе этих компонентов способствует абразивному износу оборудования.

Отходы деревообработки можно сжигать в котельных установках несколькими способами: в слое, в «кипящем» слое, используя газогенератор. Более эффективным и экологичным является сжигание отходов деревообработки при использовании газогенераторов, или по технологии двухстадийного низкотемпературного сжигания КДО в «кипящем» слое.

Данная технология основана на предварительной газификации кородревесных отходов в предтопке при температуре в слое 700-800°C и последующем дожигании продуктов газификации (парогазовой смеси с уносом мелочи полукокса) в топке котла.

В процессе газификации топливо проходит несколько превращений. При температуре свыше 250 °C начинается процесс пиролиза топлива, когда при нагревании крупные молекулы расщепляются на средние молекулы и углерод (древесный уголь).

Основными химическими реакциями являются:



Рассмотрим примерный процесс образования древесного газа из КДО.

Исходный состав кородревесных отходов: C = 21,43%, H = 2,6%, O = 16,7%, W = 57%, N = 0,16%.

На 100 грамм КДО: углерода содержится 21,43 гр., что составляет 1,8 моль, водорода 2,6 гр., что составляет 2,6 моль, кислорода 16,7 гр., что составляет 1 моль.

Для простоты расчета возьмем 1 килограмм КДО. В нем содержится 18 моль углерода, 26 моль водорода, 10 моль кислорода. На обугливание КДО требуется  $18/6 = 3$  моль кислорода, что составляет 33 литра, а в пересчете на воздух 160 литров, из которых 127 литров составляет азот (он остается в газе). Если принять соотношение прохождения реакций (1) и (2) как 8:1, то на реакцию (1) расходуется 16 молей углерода. Тогда образуется 16 молей CO и H<sub>2</sub>, что составляет по 160 литров. На реакцию (2) идет 2 моля углерода, при этом образуется 2 моля CO<sub>2</sub>, что составляет 45 литров. Половина образовавшегося водорода сгорает в реакции (3), при этом образуется 180 литров кислорода O<sub>2</sub>, т. е. образуется 900 литров воздуха. Общие затраты воздуха составляют:  $900 + 160 = 1060$  литров, из которых азот N<sub>2</sub> составляет 840 литров. Таким образом, объемный состав продуктов (только основных компонентов) составит: 360 литров CO, 45 литров CO<sub>2</sub>, 180 литров H<sub>2</sub> и 840 литров N<sub>2</sub>. В процентном соотношении: CO – 25%, CO<sub>2</sub> – 3,2%, H<sub>2</sub> – 12,5%, N<sub>2</sub> – 59%,  $Q_n^p = 6$  МДж/м<sup>3</sup>.

После данных преобразований работа котлоагрегата не зависит от исходной влажности топлива, так как в топке сжигается древесный газ из предтопка или газогенератора.

Преимуществом технологии двухстадийного низкотемпературного сжигания КДО в «кипящем» слое является возможность заметного снижения токсичных выбросов двуокиси серы и окислов азота. Древесная зола может использоваться как экологически чистое удобрение.

Процессу ограничения образования окислов азота способствует восстановительная среда на первой стадии горения (предтопок) и относительно низкие температуры факела на второй стадии (топка). Содержание окислов азота при этом способе сжигания в  $5 \div 9$  раз ниже, чем при сжигании в пылеугольной топке. Кроме того наличие углерода, CO и H<sub>2</sub> в продуктах сгорания способствует активному восстановлению окислов азота до N<sub>2</sub>, понижая тем самым их концентрацию в уходящих газах.

При сравнении выбросов газообразных загрязняющих веществ, выделяющихся при сжигании КДО (состав: C = 29,8%, H = 3,62%, O = 23,3%, S = 0,08%; N = 0,22%; W = 40%; A = 2,88%) и интинского угля (состав: C = 59,6%, H = 3,8%, O = 5,4%, S = 0,8%, N = 1,3%; W = 11,5 %; A = 25,4%) получены следующие данные, приведенные в таблице.

Таблица 1.5 – Показатели выбросов в атмосферный воздух загрязняющих веществ с дымовыми газами.

Показатели , г/с	КДО	Уголь
Оксиды азота NO <sub>x</sub>	$0,7 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-3}$
Оксиды серы SO <sub>2</sub>	$0,29 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
Оксид углерода CO	$0,21 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$
Твердые частицы	$0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,57 \cdot 10^{-3}$
Летучая зола	-	$0,36 \cdot 10^{-3}$
Бенз-а-пирен	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^{-6}$

Исходя из расчетов выбросов окислов азота, при сжигании угля, в пять раз, серы – в семь раз; оксидов углерода – в 11 раз больше, чем при сжигании КДО, а летучая зола в выбросах при сжигании древесных отходов вообще отсутствует.

Таким образом, положительными факторами перевода действующих котельных, использующих традиционное твердое или жидкое топливо, на КДО являются:

- замена дорогостоящего традиционного топлива на дешевое, или даже бросовое, что позволит снизить затраты не только на топливо, но и снизить плату за вывоз кородревесных отходов, их утилизацию, отвод земли под свалки; позволит очищать лесные участки от некондиционного, бросового леса, часто ранее оставляемого на месте вырубки.

- древесное топливо – возобновляемое.

- использование при сжигании КДО метода пиролизного генерирования газа позволит сохранить, или даже улучшить экологию региона и получить дешевую тепловую энергию.

- утилизация древесных отходов сама по себе актуальна с точки зрения охраны окружающей среды, и более эффективного использования земельных ресурсов.

### **Библиографический список:**

1. ЭнергоСовет.ru - энергосбережение - эл. ресурс - <http://www.energsovet.ru/> (от 19.05.2023г.)
2. ЛесПромИнформ – журнал №3(173) 2023г. - эл. ресурс - <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=6515>

УДК 72.021.2

### **Модульное композиционное моделирование как основа архитектурного проектирования**

Миронюк А. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В работе рассматриваются вопросы архитектурного проектирования, основанные на модульном моделировании, типы модулей и возможные комбинации пространственного решения с привлечением архитектурной композиции.

**Ключевые слова:** модуль, объемное моделирование, теория архитектурной композиции, абстрактное мышление, композиционный замысел, пластика формы

Моделирование в архитектуре – одно из средств выражения архитектурной мысли, способ передачи информации об архитектурной форме; в отличие от чертежа – объемное изображение формы и ее элементов. Моделирование – творческий процесс поиска архитектурной композиции, основа архитектурного проектирования. В работе над любым проектом модель-макет, преобразуясь в определенной последовательности, является звеном процесса проектирования. В работе над композицией изучаются основные понятия и принципы гармонической организации формы: соотношения, пропорции, ритм, равновесие, и упражнения по композиционному моделированию это отвлечение от ряда конкретных сторон архитектуры, все средства гармонизации раскрываются в них на уровне понятий, т.е. обобщений, отвлеченных от частных форм проявлений, таких как функция, конструкция, экономика. Макетная форма выполнения задания подчеркивает то обстоятельство, что закономерности построения композиционных упражнений являются объективными и не зависят от стилевых направлений в архитектуре.

Система понятий композиции построена по принципу сопоставления: массивность – пространственность, симметрия – асимметрия, динамика – статика, ритм – метр, контраст – нюанс и т.д. и характеризуются изменением свойств формы и положением ее в пространстве. Архитектурная форма, ее свойства и средства достижения выразительности создают основу восприятия, в архитектуре форма является объектом смысла для зрителя. Информационный код – сама форма. Модель, как предметный носитель образа, организует восприятие формы.

Восприятие силуэта и восприятие массы различно: если силуэт воспринимается в двух измерениях, то масса воспринимается в пространстве. Преимущество композиционного моделирования перед графическим – в наглядности поиска композиции объемной формы, во взаимосвязи с пространственным ее положением.

В композиционных упражнениях ставятся две задачи: построить вид композиции и добиться ее максимальной выразительности, используя минимальное число средств. Как представляется, модуль – условная единица измерения и форма, принятая в целях координации размеров подходит под данную задачу. Модуль (модульная система) является основой унификации геометрических размеров объемно-планировочных и конструктивных элементов. На основе модуля могут формироваться разнообразные модульные сетки – сетки с повторяющимися по форме и размерам ячейками. Такие сетки используются при построении планов зданий, могут проецироваться на фасады и определять характер отдельных конструктивных элементов, например, структурных плит покрытия. Использование модуля вносит закономерность в формирование объема и его материальной структуры, позволяет создать объем из подобных элементов, а иногда применение модуля становится единственным способом реализовать архитектурный объект сложной формы.



В модульном композиционном моделировании предлагается применять модули простых геометрических конфигураций: квадрат, круг, треугольник, куб в целях развития начального объемно-пространственного видения и архитектурно-образного мышления, сознательно отбросив вариации из сложных геометрических и криволинейных форм (рис.1).

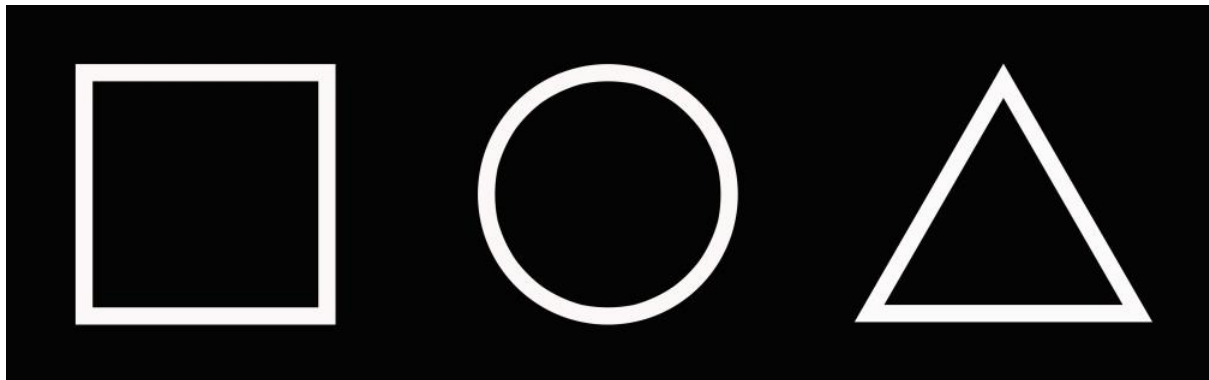


Рисунок 1 – Варианты модуля

Если рассматривать архитектуру с точки зрения объемов, то можно сказать, что многие архитектурные сооружения представляют собой простые модульные геометрические формы. Эти формы рассматриваются как символ, как один из элементов языка архитектуры, они используются во все века. Как пример можно привести пирамиды в Египте и пирамиду нового вестибюля Лувра в Париже, созданные из модульных элементов (блоков) – египетские пирамиды и за счет модульного членения пирамиды в Париже. Эмоциональное воздействие достигается изменением размеров, пропорций, массы, материала, выявлением структуры внутреннего пространства. Сооружения признанных современных архитекторов часто представляют собой простые геометрические модульные формы: капсульная башня «Накагин» архитектора Кисё Курокава (1972 г., Токио, Япония), Хабибат 67 – знаковый жилой демонстрационный проект Всемирной выставки в Монреале (1967 г.), многофункциональный комплекс Марина Сити (Marina City) в Чикаго архитектора Бертрана Голдберга. Подчеркнуть красоту и выразительность лаконичной модульной геометрической формы – непростая задача и требует изучения основных понятий «элементов архитектуры»: формы, пространства, ритма; выявления качеств композиции таких как динамика, напряженность, равновесие, устойчивость и т.п. (рис. 2).

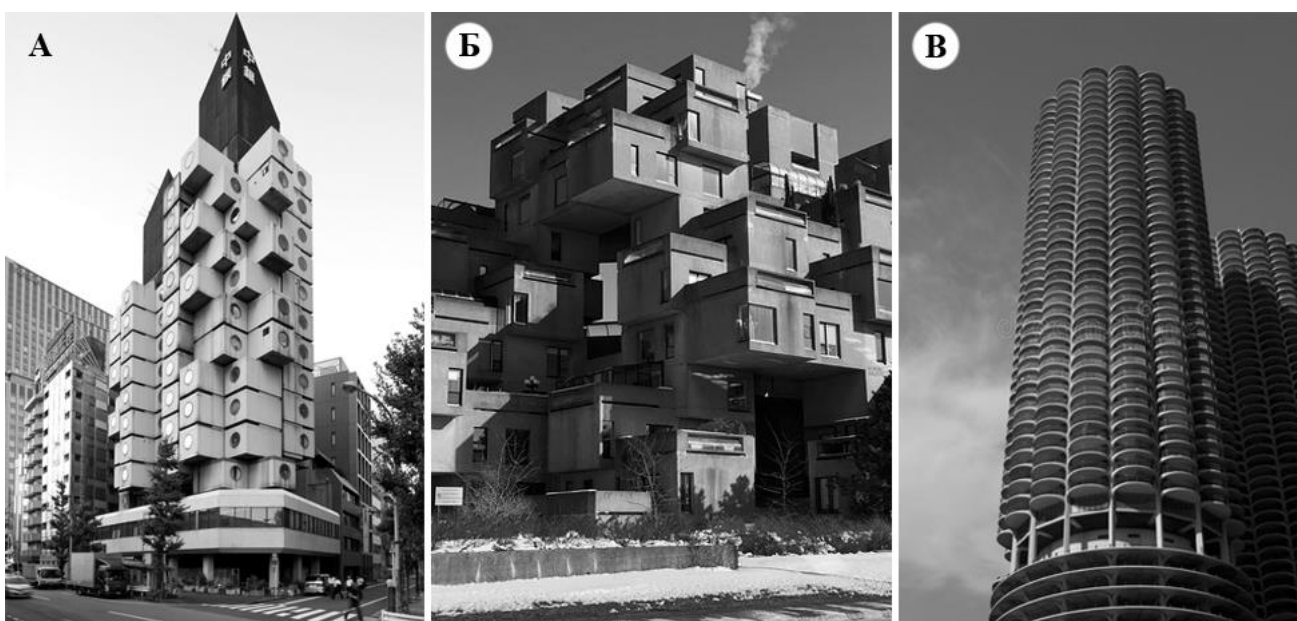


Рисунок 2 – А - капсульная башня «Накагин», Б - Хабибат 67, В - многофункциональный комплекс «Марина Сити»

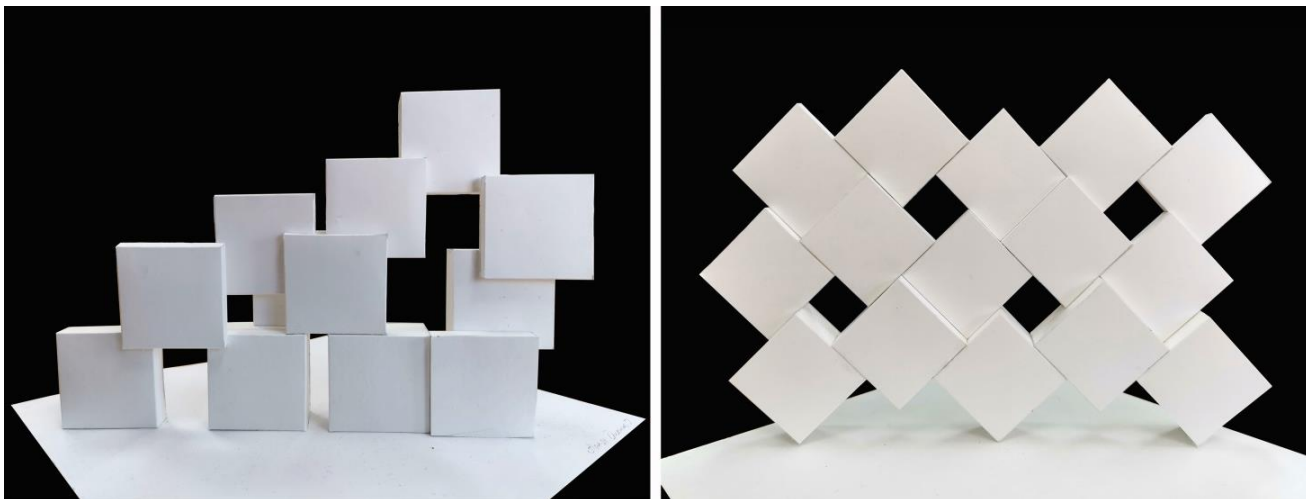


Рисунок 3 – Моделирование на основе модуль-квадрата (параллелепипеда)

Модульный принцип обладает эффектом гибкости и трансформации, возможностью обновления и добавления, внесения дополнительного напряжения через цвет или размер отдельной единицы постфактум без ущерба для основной системы, что позволяет создавать и находить новые закономерности формообразования, полезные для развития теории архитектурной композиции (рис. 3-5).

Формообразование в архитектуре – это закономерное отражение объективных зависимостей, существующих в материальной, психической и духовной сферах жизни человека. Поэтому поиск закономерностей в творчестве при решении художественных проблем становится все более актуальной задачей в учебном процессе.

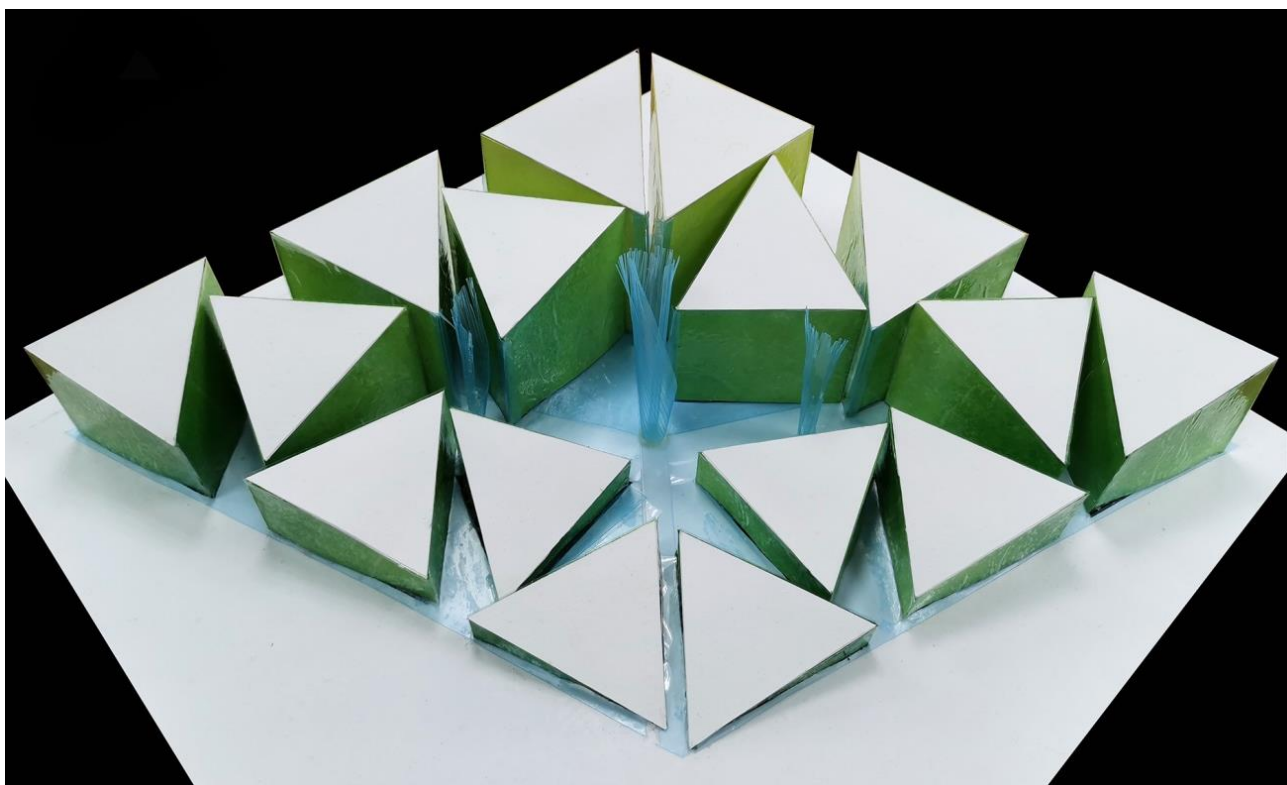


Рисунок 4 – Моделирование на основе модуль-треугольника (треугольной призмы)

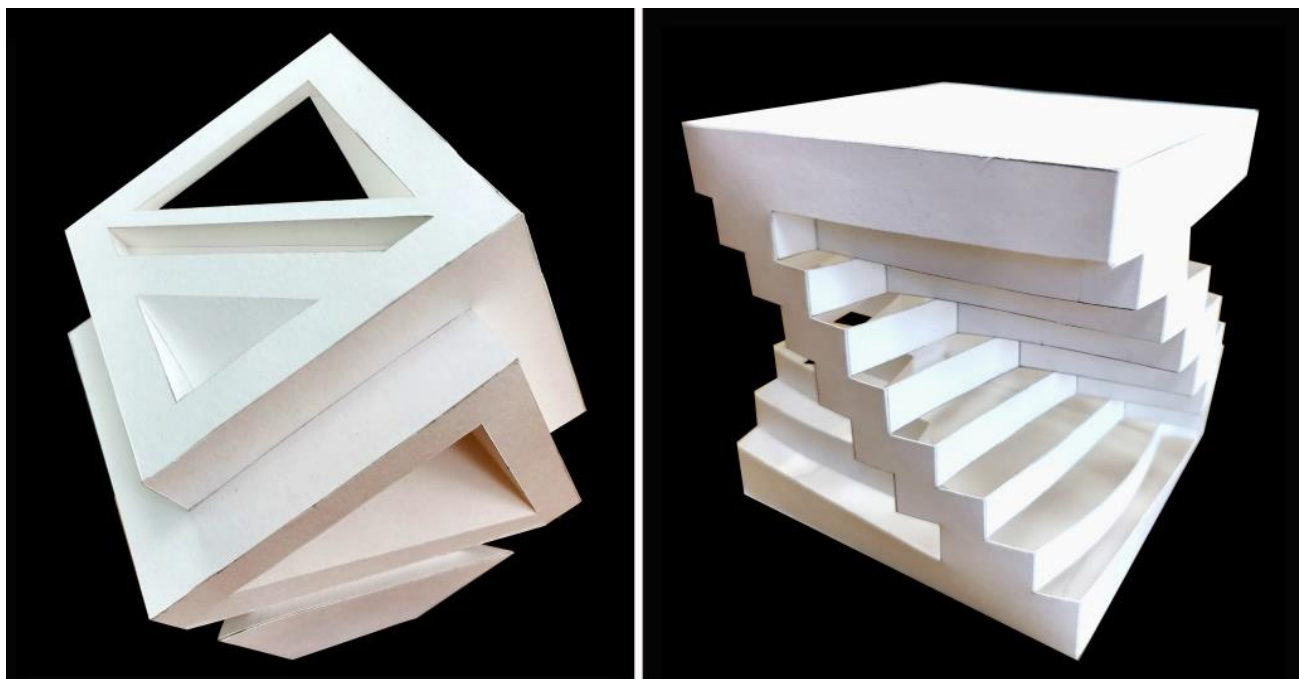


Рисунок 5 – Моделирование на основе модуль-куба

#### **Библиографический список:**

1. Стасюк Н.Г., Киселева Т.Ю., Орлова И.Г. Основы архитектурной композиции. Учебное пособие / Стасюк Н.Г., Киселева Т.Ю., Орлова И.Г. – М.: Архитектура-С, 2004, 96 с.

УДК 624.131:624.155.1

#### **Применения модели при проектировании свайных фундаментов по предельным деформациям**

Девальтовский Е. Э., Скутина Е. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье рассматривается возможность и необходимость перехода к проектированию свайных фундаментов по предельным деформациям. Указывается, что представленная авторами модель работы сваи в принципе позволяет разработать метод проектирования свайных фундаментов по предельно допустимым деформациям, что позволило бы снизить затраты на устройство свайных фундаментов и в то же время обеспечить надёжную нормальную эксплуатацию зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** свая, свайный фундамент, проектирование, деформации.

Согласно СП 24.13330.2021 СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты, расчёт свайных фундаментов должен быть выполнен в соответствии с ГОСТ 27751 по предельным состояниям двух групп:

- а) первой группы – в том числе, по несущей способности (предельному сопротивлению) грунта основания свай;
- б) второй группы – в том числе, по осадкам оснований свай и свайных фундаментов от вертикальных нагрузок.

Традиционная последовательность проектирования свайного фундамента по СП 24.13330.2021 СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты предполагает следующее:

1. Определение несущей способности сваи тем или иным методом.
2. Определение числа свай в фундаменте из условия расчёта по несущей способности одиночной сваи:

$$\gamma_n \cdot N \leq \frac{F_d}{\gamma_{c.g}} \quad (1)$$

где  $N$  – расчётная нагрузка, передаваемая на сваю от наиболее неблагоприятного сочетания нагрузок, действующих на фундамент;

$F_d$  – несущая способность одиночной сваи;

$\gamma_n$  – коэффициент надёжности по ответственности сооружения;

$\gamma_{c.g}$  – коэффициент надёжности по грунту.

3. Определение осадки свайного фундамента тем или иным методом. Должно соблюдаться условие:

$$S \leq S_u \quad (2)$$

где  $S$  – расчётное значение осадки сваи или свайного фундамента;

$S_u$  – предельное значение осадки сваи или свайного фундамента.

СП 24.13330.2021 СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты регламентирует рассчитывать свайные фундаменты с построением математических моделей, описывающих механическое поведение свайных фундаментов для предельных состояний первой или второй групп.

На практике, как правило, свайный фундамент проектируют по несущей способности одиночной сваи, а расчёт по деформациям является лишь проверочным. Даже если осадка свайного фундамента окажется много меньше допустимой, нагрузку на него увеличить нельзя согласно принятой методике. Как показывают наблюдения за осадками зданий и сооружений на свайных фундаментах, величина фактических осадок обычно бывает в пределах 2-3 см, что значительно меньше допустимых условиями расчёта по предельным деформациям.

Решить эту проблему позволит переход к проектированию свайного фундамента по предельно допустимым осадкам. Кстати, методика определения несущей способности одиночной сваи по результатам её испытания статической нагрузкой, фактически, основана на определении допустимой нагрузки на сваю в зависимости от некоторой допустимой осадки сваи, связанной с предельной осадкой фундамента переходным коэффициентом, равным 0,2.

Многие исследователи указывают на необходимость перехода к проектированию свайных фундаментов по предельным деформациям, что позволило бы снизить затраты на устройство свайных фундаментов и в то же время обеспечить надёжную нормальную эксплуатацию зданий и сооружений.

Существующая в настоящее время методика расчёта свайных фундаментов не позволяет перейти к проектированию свайных фундаментов по предельным деформациям. Основной причиной является условность расчётных схем определения несущей способности и осадок свайных фундаментов и их несоответствие друг другу. Переходить к определению количества свай в кусте по деформациям можно, лишь гарантируя обеспечение их несущей способности.

Чтобы перейти к проектированию свайного фундамента по предельно допустимым осадкам, нужна модель взаимодействия сваи с грунтом, описывающая работу не только отдельной сваи от начала загрузки до полной потери несущей способности, но и свайного фундамента, т. е. группы свай.

Здесь есть ряд сложностей, которые традиционные модели решить не могут. Основная из них – так называемый «кустовой эффект». Он заключается в том, что взаимодействие с грунтом сваи в составе группы свай отличается от взаимодействия с грунтом одиночной сваи. Это проявляется в изменении несущей способности сваи и в изменении графика зависимости «нагрузка-осадка», [1]. Проявление «кустового эффекта» зависит от грунтовых условий, параметров сваи и параметров свайного фундамента (числа свай, расстояния между сваями и т. д.), степени загрузки свайного фундамента (т. е., проявление «кустового эффекта» изменяется по мере загрузки свайного фундамента).

Автором разработана универсальная модель взаимодействия сваи с грунтом, описывающая работу, как одиночной сваи, так и группы свай.

Модель позволяет проследить взаимодействие с грунтом сваи или свайного фундамента от начала загрузки до полной потери несущей способности и способна учитывать влияние:

- низкого роста (в свайно-плитном фундаменте) [2];
- пригружающих оснований напряжений [3];
- неоднородность грунтов [4];
- сжимаемость ствола сваи [5].

Например, она показывает, что передача нагрузки на грунт стволу одиночной и кустовой свай сильно отличаются. Причём характер и интенсивность передачи нагрузки зависят не только от параметров сваи и куста, грунтовых условий, но и от степени загрузки сваи.

Данная модель в принципе позволяет разработать метод проектирования свайных фундаментов по предельно допустимым деформациям. Метод должен учитывать особенности взаимодействия с грунтом одиночной сваи и сваи в составе свайного фундамента и позволять при известных прочностных и деформационных характеристиках грунтов основания прогнозировать осадки и несущую способность как одиночных свай, так и свайных фундаментов. Как положительный, так и отрицательный эффект группового взаимодействия свай в фундаменте при различных грунтовых условиях, параметров фундамента и допустимых осадках должен выявляться автоматически в процессе проектирования.

Разработка методики проектирования свайных фундаментов, исходя из расчёта по деформациям (подобной методике СП 24.13330.2021 СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты), требует всесторонних и длительных исследований.

Результаты наших исследований указывают на необходимость и возможность перехода к проектированию свайных фундаментов, исходя из расчёта по деформациям.

В настоящее время может быть предложен следующий путь проектирования:

1) Определение необходимых для расчёта прочностных и деформационных характеристик грунта и их уточнение, если это возможно, по результатам статических испытаний одиночных свай и свайных фундаментов.

2) Выбор оптимальных параметров свай в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства.

3) Определение необходимого числа свай либо по методике СП 24.13330.2021 СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты, либо исходя из предельно допустимых осадок.

4) Уточнённый расчёт и построение графиков нагрузка-осадка по предлагаемой модели и, если необходимо – корректировка параметров свай и свайного фундамента (длины свай, их числа, расстояния между сваями и т. д.).

### **Библиографический список:**

1. Фадеев А.Б., Девальтовский Е.Э. Кустовой эффект при работе свайных фундаментов на вертикальную нагрузку. Ускорение научн-технического прогресса в фундаментостроении. Сб. науч. Тр. В 2 т. Т 2. Методы проектирования эффективных конструкций оснований и фундаментов//НИИ оснований и подземных сооружений. Под общ. Ред. В.А. Ильичёва. – М.: Стройиздат, 1987, с. 33-34.
2. Девальтовский Е.Э., Чернощёкова Ю.П. Взаимодействие свай с грунтом при наличии низкого роста. Сборник научных трудов. Материалы научно-технической конференции (14-17 апреля 2009 г.): в 2 ч.; ч.1 – Ухта: УГТУ, 2009, с. 279-283.
3. Девальтовский Е.Э., Каракчиева А. В. Взаимодействие с грунтом вертикально нагруженной сваи при наличии пригрузки. Сборник научных трудов. Материалы научно-технической конференции (20-23 сентября 2011 г.): в 3 ч.; ч.1 – Ухта: УГТУ, 2011, с. 358-362.
4. Девальтовский Е.Э. Упругое взаимодействие с неоднородным грунтом вертикально нагруженной сваи. Сборник научных трудов. Материалы научно-технической конференции (13-15 апреля 2010 г.): в 2 ч.; ч.1 – Ухта: УГТУ, 2010, с. 364-368.
5. Девальтовский Е.Э., Шарыгина А. В. Модель взаимодействия с грунтом вертикально нагруженной сжимаемой сваи. Наука. Техника. Инновации [Текст]: материалы VIII международной научно-технической конференции (20 апреля 2018 года). Филиал Ухтинского государственного технического университета в г. Усинске (УФ УГТУ)/ под ред. Я. В. Зубовой. Уфа: НИЦ «АЭТЕРНА», 2018. с. 65-72 (РИНЦ).

## Особенности взаимодействия с грунтом одиночной и кустовой свай

Девальтовский Е. Э., Скутина Е. В.

*Ухтинский государственный технический университет, г. Ухта, Россия*

**Аннотация.** В статье представлены основные экспериментально выявленные особенности взаимодействия свай и свайных фундаментов с грунтом. Рассмотрены особенности взаимодействия с грунтом одиночной и кустовой свай, выявленные с помощью разработанной модели работы свай. Представлены эпюры сдвигающих напряжений по стволу свай.

**Ключевые слова:** одиночная свая, кустовая свая, грунт, напряжения, деформации.

Выделим основные экспериментально выявленные особенности взаимодействия свай и свайных фундаментов с грунтом:

1. Осадки свайных фундаментов при рабочих нагрузках обычно в несколько раз превышают осадки одиночных свай, что зависит от параметров свайных фундаментов и грунтовых условий. При нагрузках, близких к предельным, картина меняется и осадки одиночных свай, как правило, носящие провальный характер, начинают превосходить осадки свайных фундаментов.

2. Зафиксированы максимальные перемещения межсвайного грунта у поверхности земли, минимальные – на уровне нижних концов свай, свидетельствующие об уплотнении межсвайного грунта.

3. Предельная несущая способность свай в составе свайного фундамента превышает несущую способность одиночной свай. Некоторые исследователи отмечают обратное при изучении работы свайных фундаментов в слабых глинистых грунтах и заиленных песках, но при этом за несущую способность свайных фундаментов ими принята нагрузка при достижении свайным фундаментом некоторой предельной величины осадки.

4. Изменяется характер передачи усилий при взаимодействии с грунтом кустовой свай по сравнению с одиночной: снижается нагрузка, передаваемая стволом свай и увеличивается доля острия в передаче нагрузки.

5. Наблюдается неравномерность распределения нагрузки между сваями в кусте. Наиболее нагружена угловая свая, наименее – центральная.

6. Рядом исследователей установлено явление блокирования или омоноличивания межсвайного грунта при расстоянии между сваями до 3-х диаметров свай, заключающееся в совместном перемещении свай и межсвайного грунта.

Проявление выявленных особенностей взаимодействия с грунтом свай и свайных фундаментов зависит от их параметров, грунтовых условий и степени нагружения.

Разработанная модель работы свай [1] позволяет проанализировать взаимодействие с грунтом как одиночной свай, так и кустовой свай.

Приведём некоторые результаты такого анализа. Рассмотрим взаимодействие с грунтом (мягкопластичная глина) одиночной свай (длиной 10 м и радиусом 0,25 м) и кустовой свай с расстоянием между сваями 3 диаметра свай).

Модель выявила значительное отличие во взаимодействии с грунтом одиночной и кустовой свай.

Анализ показывает, что сдвигающие напряжения по стволу кустовой свай в стадии упругого взаимодействия значительно меньше, чем у одиночной (рисунок 1). Причём активно взаимодействует с грунтом лишь нижняя часть ствола кустовой свай. Это хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Но модель выявила принципиальные отличия в процессах проскальзывания по грунту стволов одиночной и кустовой свай. Срыв по стволу одиночной свай начинается у головы свай (рисунок 1), где сдвигающие напряжения достигают предельных значений, и протекает сверху вниз (рисунок 2). У кустовой свай сдвигающие напряжения достигают предельных значений у нижнего конца свай (рисунок 1) и срыв по стволу свай протекает снизу-вверх (рисунок 2).

В процессе проскальзывания ствола одиночной сваи по грунту, нагрузка, передаваемая стволом сваи увеличивается незначительно (рисунок 1 и 3), тогда как у кустовой сваи её рост значителен (рисунок 1 и 3), но достигается при больших осадках свай.

Также значительно увеличивается передача нагрузки нижним концом кустовой сваи по сравнению с одиночной из-за пригрузки грунта напряжениями, возникающими в межсвайном грунте при передаче нагрузки стволом сваи.

Проявление «кустового эффекта» (увеличение несущей способности кустовой сваи по сравнению с одиночной) проявляется, при значительных осадках. При осадках же в 2-3 см нагрузка, передаваемая одиночной сваей, как правило, больше, чем кустовой.

Выявленные особенности взаимодействия с грунтом одиночной и кустовой свай хорошо согласуются с экспериментальными данными.

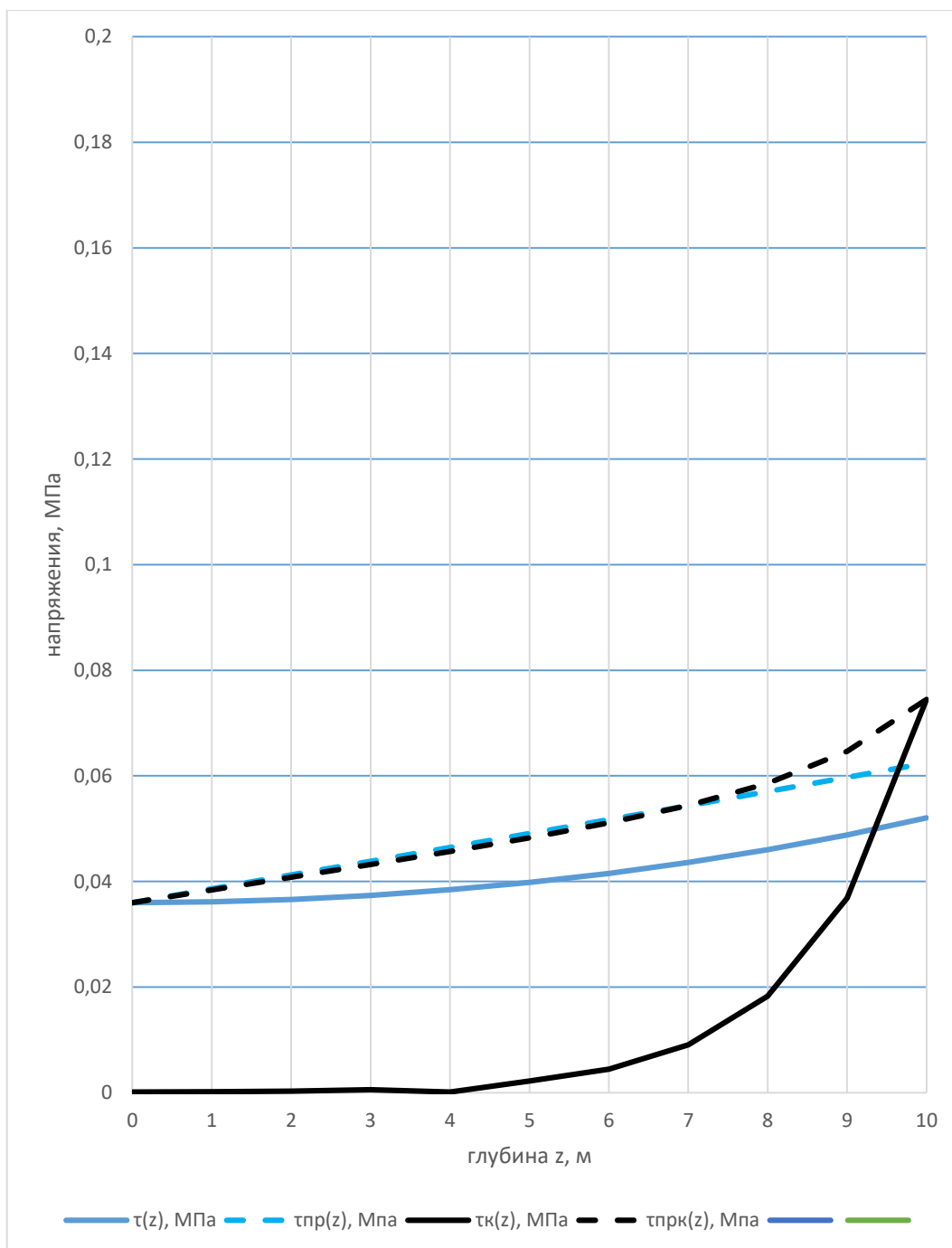


Рисунок 1 – Эпюры сдвигающих напряжений по стволу одиночной и кустовой свай на границе его упругой работы: сплошная линия – сдвигающие напряжения по стволу сваи; пунктирная линия – предельные сдвигающие напряжения по стволу сваи

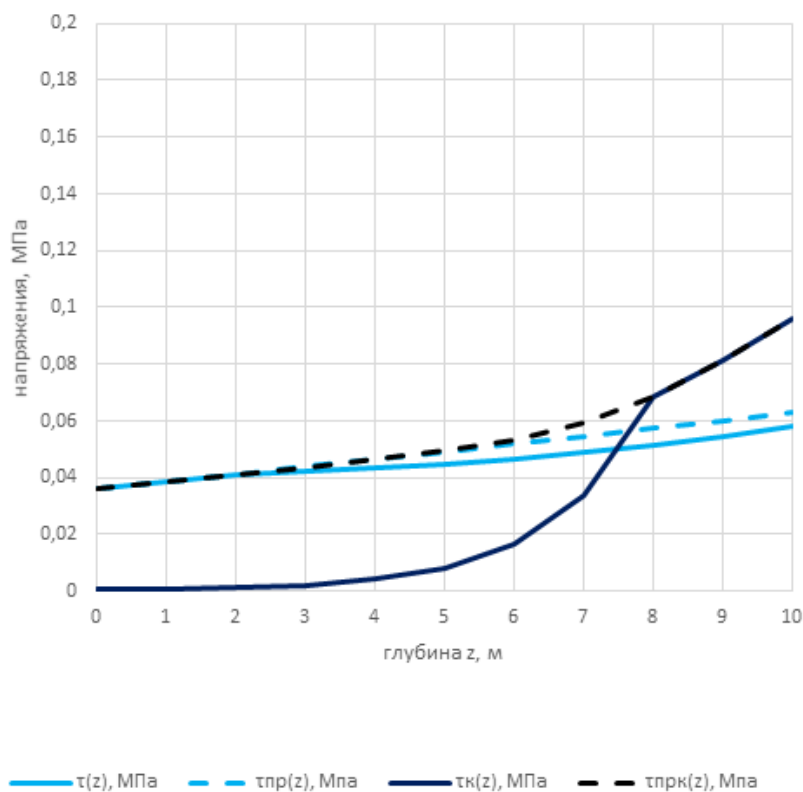


Рисунок 2 – Эпюры сдвигающих напряжений по стволу одиночной и кустовой свай в процессе проскальзывания ствола на 2 м: сплошная линия – сдвигающие напряжения по стволу сваи; пунктирная линия – предельные сдвигающие напряжения по стволу сваи

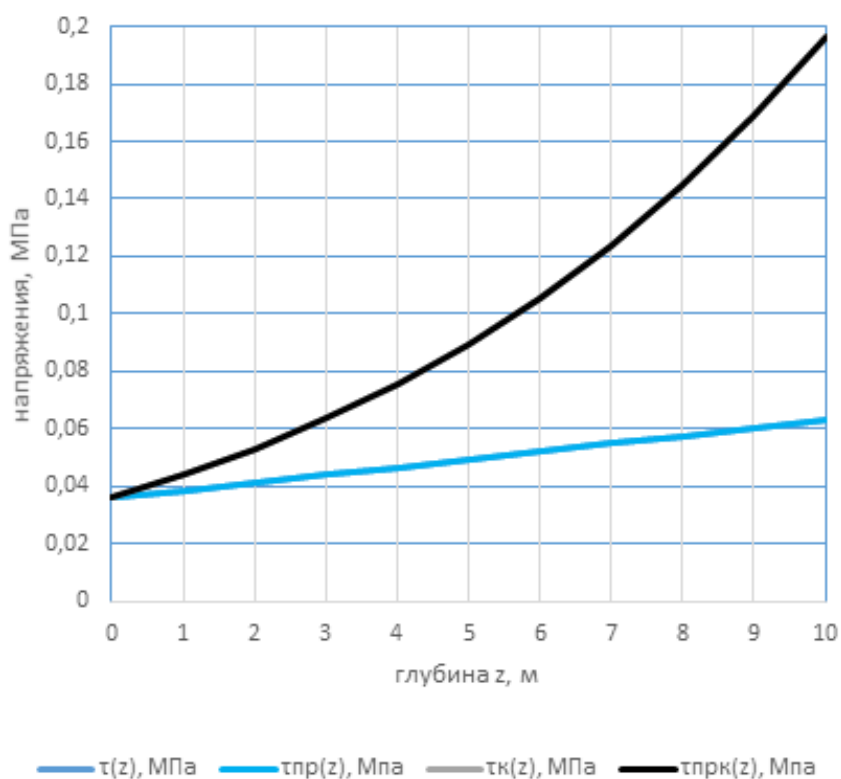


Рисунок 3 – Эпюра сдвигающих напряжений по стволу одиночной и кустовой свай при полном срыве ствола сваи по грунту

**Библиографический список:**

1. Девальтовский Е.Э. Исследование работы свайных фундаментов с учётом их взаимодействия с межсвайным грунтом. Дисс. на соиск. уч. степ. к.т.н., Л., ЛИСИ, 1982., и др..



**Совершенствование воздушного режима при производстве фармацевтической продукции на примере производства твердых лекарственных форм /  
Improving the air regime in production pharmaceutical products on the example of production solid dosage forms**

Ильин Е. А.

Научный руководитель – Уляшева В. М.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** Фармацевтическое производство и инженерные системы неразрывно связаны организацией воздушного режима. В данной статье описывается производство твердых лекарственных форм и возможности системы вентиляции по снижению риска возникновения загрязнений в рабочей зоне вблизи оборудования. Изучено распространение взвешенных частиц в производственном помещении, что необходимо для повышения эффективности удаления загрязняющих частиц. Также рассмотрен процесс перекрёстной контаминации, который напрямую влияет на нормативные значения чистоты воздуха.

**Ключевые слова:** твердая лекарственная форма, взвешенные частицы, загрязнение, перекрёстная контаминация, воздушный режим,

**Abstract.** Pharmaceutical production and engineering systems are inextricably linked with the organization of the air regime. This article describes the production of solid dosage forms and the ability of the ventilation system to reduce the risk of contamination in the work area near the equipment. The distribution of suspended particles in the production room was studied, which is necessary to improve the efficiency of the removal of polluting particles. The process of cross-contamination, which directly affects the standard values of air purity, is also considered.

**Key words:** solid dosage form, suspended particles, contamination, cross-contamination, air mode.

Поддержание нормируемых параметров микроклимата и чистоты воздуха в помещениях фармацевтических производств, несомненно, является актуальной задачей. В нашей стране большое количество фармацевтических производств и с каждым годом это количество растет [1].

Каждое фармацевтическое производство специализируется на изготовлении определенных препаратов, но разделить данные препараты можно по лекарственной форме. Существует четыре типа лекарственных форм: твердая, мягкая, жидкая, газообразная лекарственные формы [2]. Также в зависимости от лекарственной формы можно разделить системы вентиляции воздуха, начиная от организации воздухообмена, заканчивая монтажными элементами системы.

В данной статье рассмотрен один вид лекарственной формы - твердая лекарственная форма (Далее – ТЛФ). К ТЛФ относятся таблетки (с пленочным покрытием и без покрытия), капсулы (твердые или мягкие) и порошки (простые или комплексные смеси).

Производство ТЛФ включает перенос порошковых материалов в упакованную лекарственную форму в ограниченных шагах технологического процесса. Процесс производства может быть как открытым, так и закрытым. При открытом производстве, могут возникнуть проблемы, связанные с контролем порошковых частиц и потенциальной перекрестной контаминацией [3]. На рис. 1 представлена схема процесса производства ТЛФ.

Для проектирования внутренних инженерных систем необходимо соблюдать следующую последовательность:

- 1) Определение производимой лекарственной формы;
- 2) Описание технологии производства;
- 3) Проектирование системы внутренних инженерных систем (вентиляция, кондиционирование воздуха, отопление, водоснабжение, водоотведение, электроснабжение и др.).

Главный риск, связанный с загрязнением, - это риск перекрестной контаминации, возникающий при засыпании сырья в фармацевтическое оборудование [4]. На рис. 2 представлена схема предполагаемого распространения взвешенных частиц.



Рисунок 1 - Схема процесса производства ТЛФ

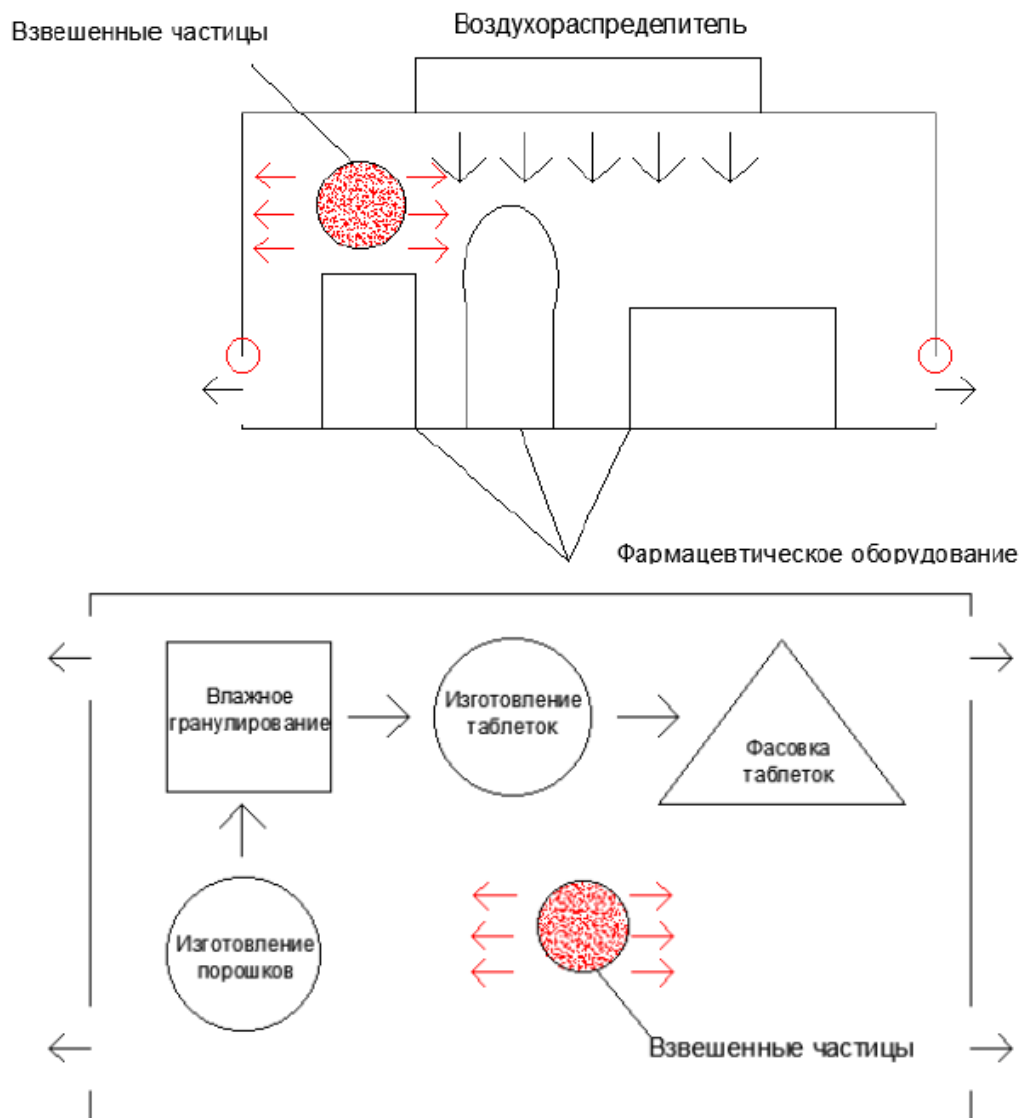


Рисунок 2 - Схема распространения взвешенных частиц

В процессе производства при засыпании сыпучего материала в оборудование, может возникнуть облако пыли в открытом пространстве. Возможно использовать систему местных отсосов у такого оборудования, но в большинстве случаев используется общеобменная система вентиляции, которая способна удалить такие частицы только с помощью грамотно спроектированной системы вентиляции. Есть два варианта организации воздухообмена – однонаправленными и неоднаправленными потоками. За счет регулирования скорости подаваемого воздуха процесс стабилизации воздушного потока и удаление взвешенных частиц ускорится [5].

Оборудование вокруг, которого может образовываться пылевое облако, как правило, гранулятор. На рисунке 3 представлены виды грануляторов.



Рисунок 3 - Виды грануляторов (слева-направо: высокоскоростной калибровочный гранулятор; гранулятор маятникового типа; супер-миксер гранулятор)

В условиях реальной производственной линии гранулятор располагается в начале цикла производства, но перекрестная контаминация может возникать на любой стадии производства [6]. На рис. 4 представлена закрытая производственная линия твердых лекарственных форм.



- 1 – высокоскоростной гранулятор мокрого смешивания;  
 2 – сушилка в псевдокипящем сжиженном слое; 3 – опудриватель; 4 – вибрационное сито;  
 5 – высокоскоростной смеситель для сухой и влажной грануляции;  
 6 – фармацевтический подъемник; 7 – фасовочное оборудование

Рисунок 4 - Расположение технологического оборудования

Данное исследование дает представление о проблемных точках воздушного режима фармацевтической промышленности, а также толчок к систематизации знаний, связанных с системами вентиляции и кондиционирования воздуха. Одной из главных задач системы вентиляции воздуха фармацевтической промышленности является снижение загрязнения производимой продукции и издержек на эксплуатацию инженерных систем.

### Библиографический список:

1. Национальные проекты «Здравоохранение» и «Демография» // Министерство здравоохранения Российской Федерации URL: <https://minzdrav.gov.ru/poleznye-resursy/natsproektzdravoohranenie> (дата обращения: 20.05.2023).
2. Дзюба В.Ф. Твердые лекарственные формы: учеб. пособие / В.Ф. Дзюба. Воронеж.: ВГУ, 2011. – 125 с.
3. Приказ Минпромторга России "Об утверждении Правил надлежащей производственной практики" от 25.06.2021 № 14.06.2013 // Минпромторг. - 2013 г. - № 916. - с изм. и допол. в ред. от 18.12.2015
4. EU GMP (Guide to Good Manufacturing Practice). URL: [https://ec.europa.eu/health/documents/eudralex/vol-4\\_en](https://ec.europa.eu/health/documents/eudralex/vol-4_en) (дата обращения 11.02.2021)
5. Федотов, А.Е. Чистые помещения / А.Е.Федотов. – Москва: АСИНКОМ, 2003. – 576 с.
6. Baseline pharmaceutical engineering guide (Volume 3 - Commissioning and Qualification) / I. S. of. — [Tampa]: International Society for Pharmaceutical Engineering, 2013. – p.192

УДК 622.4

### Численное моделирование системы вентиляции помещений сварочных цехов больших объемов

Пономарев Н. С.<sup>1</sup>, Джин Хевэй<sup>1</sup>, Сон Ян Пин<sup>2</sup>

*1 - Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

*2 - Хэнаньский градостроительный университет, г. Пиндиншань,  
Китайская Народная Республика*

**Аннотация.** В данной работе исследуется влияние скорости подачи воздуха приточной общеобменной системой вентиляции на скорость удаления частиц размером 10 мкм (PM10) в крупногабаритном сварочном цехе. Исследования показали, что увеличение скорости подачи воздуха может значительно увеличить скорость снижения концентрации взвешенных частиц в зоне активной деятельности людей. Для достижения большей эффективности пылеудаления систему общеобменной вентиляции необходимо сочетать с местной системой вентиляции.

**Ключевые слова:** сварочный цех, система вентиляции, пылеудаление, PM10.

#### Введение

С развитием промышленности процесс сварки стал особенно распространенным в металлообрабатывающей промышленности. Во время процесса сварки образуются высокотемпературные сварочные дымы. Основным компонентом является оксид железа, который смешивается с оксидом кремния и различными следами оксидов металлов. Этот вид дыма вызывает респираторные и сердечно-сосудистые заболевания, а также серьезно влияет на физическое и психическое здоровье персонала [1]. Поэтому необходимо удалять сварочный дым. Из-за большой высоты, объема и протяженных рабочих зон особенно трудно собирать сварочные аэрозоли в помещениях сварочных цехов. При выбросе загрязненного воздуха без очистки в атмосферу наносится вред окружающей среде и здоровью населения, поэтому в сварочном цехе необходимо предусмотреть системы общеобменной и местной вентиляции с очисткой от сварочных аэрозолей.

#### Результаты моделирования и анализ

Объектом исследования является крупный сварочный цех, расположенный в провинции Хэнань, Китай, длиной, шириной и высотой 198 м, 66 м и 13,7 м соответственно (см. рис. 1). Для предотвращения распространения сварочного дыма в атмосферу при входе и выходе из цеха установлены воздушные завесы, блокирующие неконтролируемый выпуск загрязненного воздуха. В сварочном цехе во избежание влияния прокладки воздухопроводов на движение мостового крана приточные воздухопроводы для подачи свежего воздуха только в нижнюю зону деятельности персонала размещены вдоль колонн. Имеются шесть независимых воздухопроводов

подачи воздуха, расстояние между соседними воздуховодами составляет 36 метров, каждый из них имеет четыре воздухораспределителя. Два в средней части являются четырехсторонними и два односторонних. Высота выпуска от 0,5 до 1,5 м, ширина 0,5 м. Во избежание образования зон скопления частиц, вызванных неравномерным потоком воздуха в цехе, направление потока воздуха меняется со временем, период изменения составляет 60 секунд. Диапазон изменения направления струи находится в пределах  $60^\circ$  влево и вправо, перпендикулярно направлению плоскости выпуска воздуха. Для иллюстрации схемы подачи воздуха на рисунке 2 показан результат численного моделирования скорости вблизи определенного отверстия подачи воздуха для трех различных моментов времени (2,5 с, 30 с, 57,5 с) при скорости подачи воздуха 20 м/с. Максимальная расчетная скорость подачи воздуха в цехе составляет 20 м/с, удаление отработанного воздуха осуществляется сверху. Имеется 15 выпусков воздуха, каждый из которых оснащен электростатическим фильтром.



Рисунок 1 - Типовая схема сварочного цеха и системы подачи и вытяжки воздуха

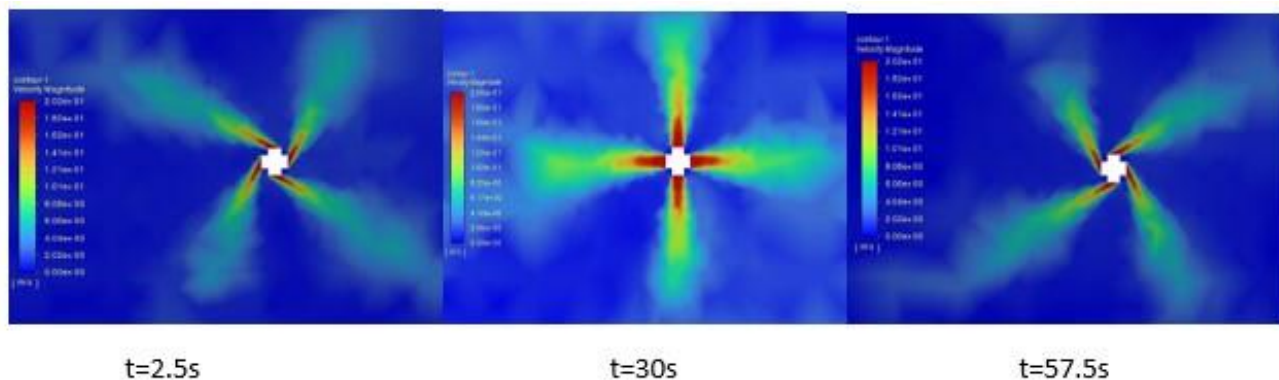


Рисунок 2 - Схематическая диаграмма изменения направления подачи воздуха в системе подачи воздуха во времени (три промежуточных момента 2,5 с 30 с и 57,5 с)

Для моделирования вентиляционных процессов в цехе используется программа FLUENT. В течение 0,1 секунды в цех равномерно распыляется 1 кг частиц  $Fe_2O_3$  с размером частиц 10 мкм с плоскости высотой 0,5 метра, скорость распыления 1 м/с (вертикально вверх). Граничное условие скорости подачи воздуха принимают 5 м/с, 10 м/с, 15 м/с, 20 м/с соответственно; на выходе выброса используется граница свободного потока, а процесс движения частиц задается моделью DPM. Средняя концентрация твердых частиц в рабочей зоне (на высоте 1,5 м) и средняя концентрация твердых частиц в цехе в целом изменяются во времени. Столкновением и взаимодействием частиц, явлением термофореза, вызванного градиентом температуры, можно пренебречь [2]. Учитывается только влияние турбулентности и сила Саффмана [3]. Всего в модели 7995869 сеточных элементов, а качество интегрированных элементов превышает 0,4.

Результаты исследования, представленные на рисунке 3, показывают, что концентрация твердых частиц в зоне деятельности персонала быстро снижается, а результаты исследования, представленные на рисунке 4 показывают, что общее количество твердых частиц в цехе медленно уменьшается. Хотя увеличение скорости воздуха может увеличить скорость снижения

концентрации твердых частиц в зоне деятельности персонала, уменьшение общего количества твердых частиц в цехе все еще происходит медленно. Необходимо 120 секунд, чтобы снизить концентрацию PM10 в цехе на 45%. Увеличивать расход системы вентиляции для увеличения скорости подачи воздуха для достижения эффективного удаления пыли нереально, и ее необходимо сочетать с другими локальными вытяжными системами для удаления пыли.

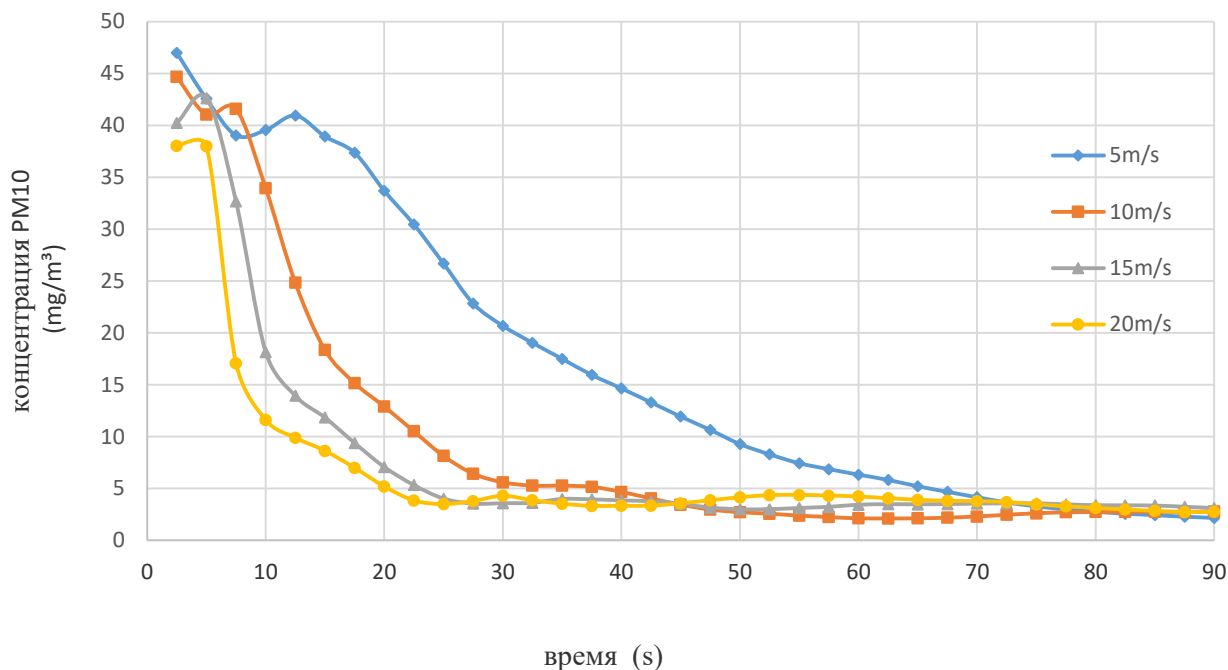


Рисунок 3 - Кривая изменения концентрации PM10 в зоне деятельности персонала

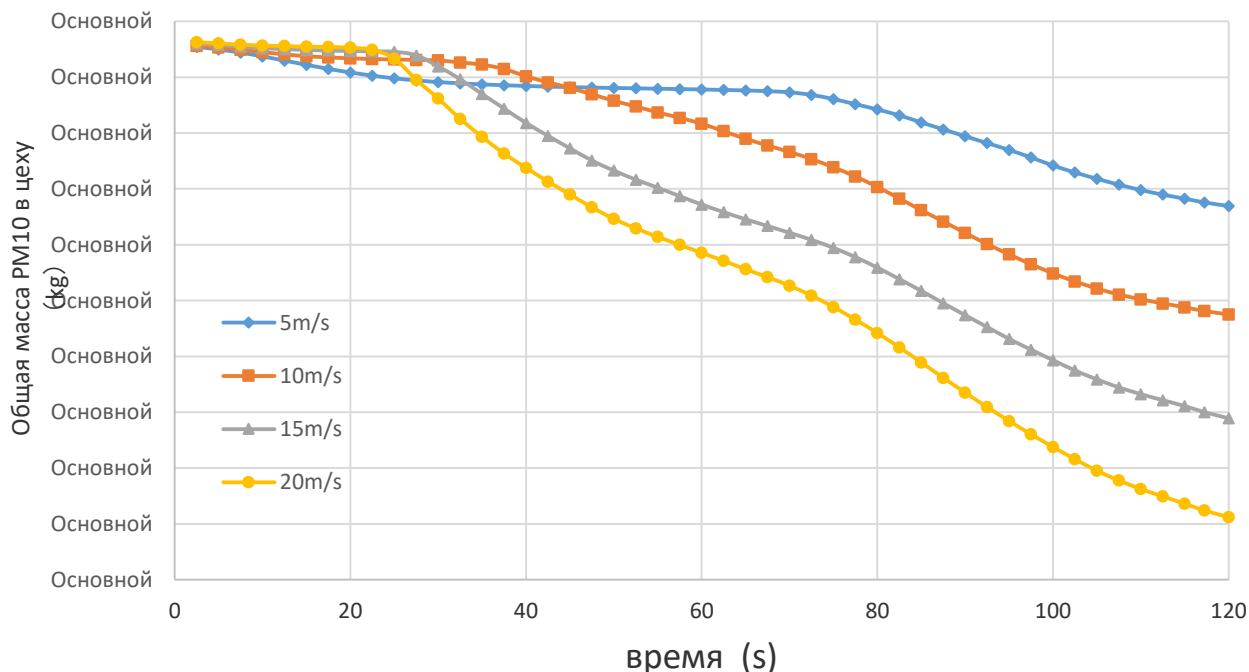


Рисунок 4 - Кривая изменения общей массы PM10 в цехе

**Библиографический список:**

1. Lai A C K, Nazaroff W W. Supermicron particle deposition from turbulent chamber flow onto smooth and rough vertical surfaces[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(27): 4893-4900.

2. Chen X, Li A, Gao R. Effects of near-wall heat source on particle deposition[C]. Building Simulation. Tsinghua Press, 2012, 5(4): 371-382.
3. SHIMADA M, OKUYAMA K, KOUSAKA Y, et al. Turbulent and Brownian diffusive deposition of aerosol particles onto a rough wall[J]. Journal of chemical engineering of Japan, 1987, 20(1): 57-64.

УДК 697

**Сравнительный анализ конструкций теплоутилизатора с тепловыми трубами при помощи Ansys Fluent / Comparative analysis of heat exchanger designs with heat pipes using Ansys Fluent**

Тимофеев А. В.

Научный руководитель – Яковлев В. А.

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,  
г. Санкт-Петербург, Россия*

**Аннотация.** В статье представлен сравнительный анализ теплообменника на тепловых трубах двух конструкций для утилизации теплоты вентиляционных выбросов. Дана характеристика применения теплообменников с тепловыми трубами. Анализ работы устройств был выполнен с помощью программного комплекса ANSYS Fluent. Результаты моделирования сопоставлены с результатами прямого физического эксперимента, выполненного на испытательном стенде в лаборатории.

**Ключевые слова:** утилизатор теплоты, тепловая труба, тепловой режим, конденсация, испарение, численное моделирование.

**Abstract.** The article presents a comparative analysis of a heat exchanger on heat pipes of two designs for the utilization of heat from ventilation emissions. The characteristic of the use of heat exchangers with heat pipes is given. The analysis of the operation of the devices was performed using the ANSYS Fluent software package. The simulation results are compared with the results of a direct physical experiment performed on a test bench in the laboratory.

**Key words:** heat exchanger, heat pipe, thermal condition, condensation, evaporation, numerical simulation.

Одним из принципиальных направлений оптимального использования энергоресурсов является утилизация низкопотенциальной теплоты удаляемого из помещений вентиляционного воздуха с применением его для частичного нагрева приточного воздуха. С целью практической реализации в проектах вентиляционных систем необходимо устанавливать теплообменники, конструкции которых позволят провести процесс утилизации теплоты с на техническом уровне и экономически оправданной эффективностью [1, 2, 5].

Теплообменники – утилизаторы теплоты с тепловыми трубами относятся к рекуперативным теплообменникам с промежуточным теплоносителем. Отличие их от теплообменников с промежуточным теплоносителем заключается в отсутствии механического побуждения циркуляции теплоносителя и организации ее за счет сил гравитации и поверхностного натяжения жидкости. В следствии низких температурных напоров между теплообменивающими средами в системах вентиляции, теплообменники на тепловых трубах часто имеют сильные ограничения по применению. Тем не менее, исходя из их высокой надёжности, и выполнении условия усовершенствования конструкции под определённые условия работы, в ряде случаев использование утилизаторов с тепловыми трубами в системах вентиляции может быть целесообразным и экономически оправданным решением.

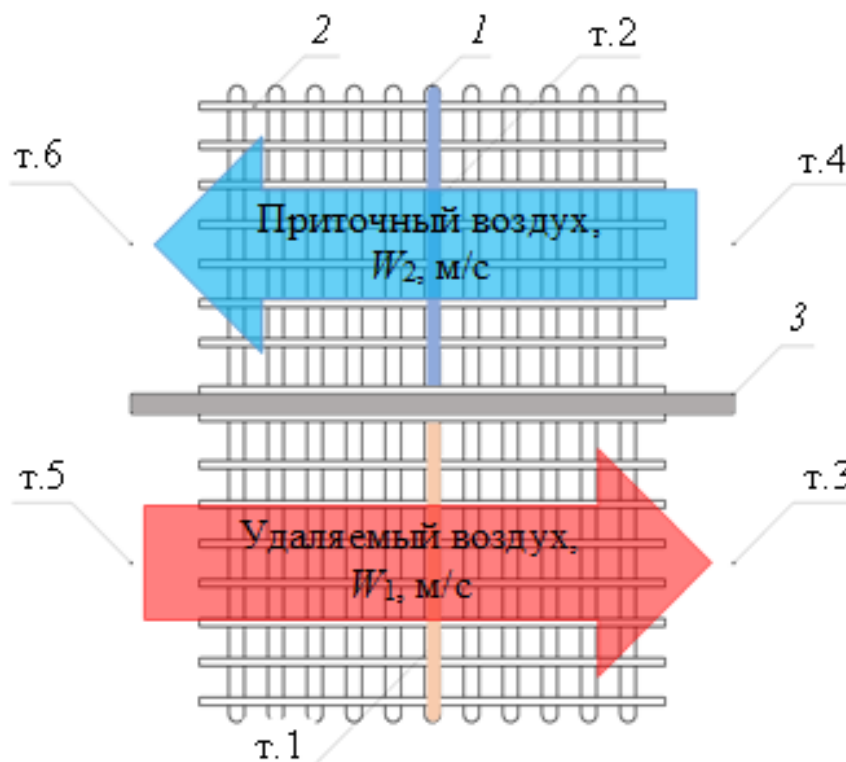
Для проведения сравнительного анализа было принято два варианта конструкции теплообменника с противоточным движением воздушных потоков: с 28 пластинами при которых шаг между теплообменными пластинами составляет 10 мм (общая площадь теплообменной поверхности 3,1 м<sup>2</sup>); с 54 пластинами при которых шаг между теплообменными пластинами составляет 5 мм (общая площадь теплообменной поверхности 6,0 м<sup>2</sup>).

В системах вентиляции и кондиционирования воздуха в качестве рабочей жидкости следует использовать безопасные для здоровья человека вещества, а в качестве материала для изготовления тепловых труб высокотеплопроводные медь и алюминий.

В целях сопоставления основных параметров работы теплообменника обеих конструкций были проведены лабораторные исследования в климатической камере и численное моделирование. При исследованиях поддерживались температуры:

- вытяжного воздуха + 70 °С;
- приточного воздуха + 25 °С и + 50 °С.

В ходе исследований замерялись температуры и расходы приточного и вытяжного воздуха, температура стенки тепловой трубы, расположенной в центре теплообменника. Экспериментальные точки, в которых проводились измерения, показаны на рисунке 2, а экспериментальные данные сведены в табл. 1.



1 – тепловая труба, работа которой экспериментально проверялась; 2 – теплообменная пластина; 3 – разделительная секция корпуса (межсекционная перегородка)

Рисунок 2 - Схема расположения экспериментальных точек для измерения температуры при проведении исследования:

Таблица 1 – Результаты измерений параметров теплоутилизатора

№ измерения	Средние значения температуры среды в экспериментальных точках, °С						Массовый расход приточного воздуха $G_{m1}$ , кг/ч	Массовый расход вытяжного воздуха $G_{m2}$ , кг/ч
	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5	т.6		
28 теплообменных пластин								
1	62,6	48,3	55,9	27,1	74,7	45,6	454,2	447,0
2	64,5	58,6	63,1	50,1	72,6	57,0	421,9	306,0
54 теплообменные пластины								
1	64,8	61,3	42,0	26,5	68,6	49,4	451,2	388,0
2	66,4	65,9	55,7	52,0	68,8	64,1	419,4	604,0



Анализ работы теплообменника с тепловыми трубами выполнялся с применением программного комплекса для математического моделирования *ANSYS Fluent*. Поскольку моделирование всего теплообменника является ресурсоемкой задачей было принято упрощение модели, а именно теплообменник разделен на периодические фрагменты, повторяющие друг друга. Моделирование проводилось с применением *k-ε* модели турбулентности модификации «*Realizable*» [3, 4].

После решения поставленной задачи был получен комплекс значений температур, расходов воздуха, полных давлений в входных и выходных границах теплообменников обеих конструкций (рис. 3, табл. 2), эти данные внесены в табл. 2 в соответствии с месторасположением экспериментальных точек на рисунке 2.

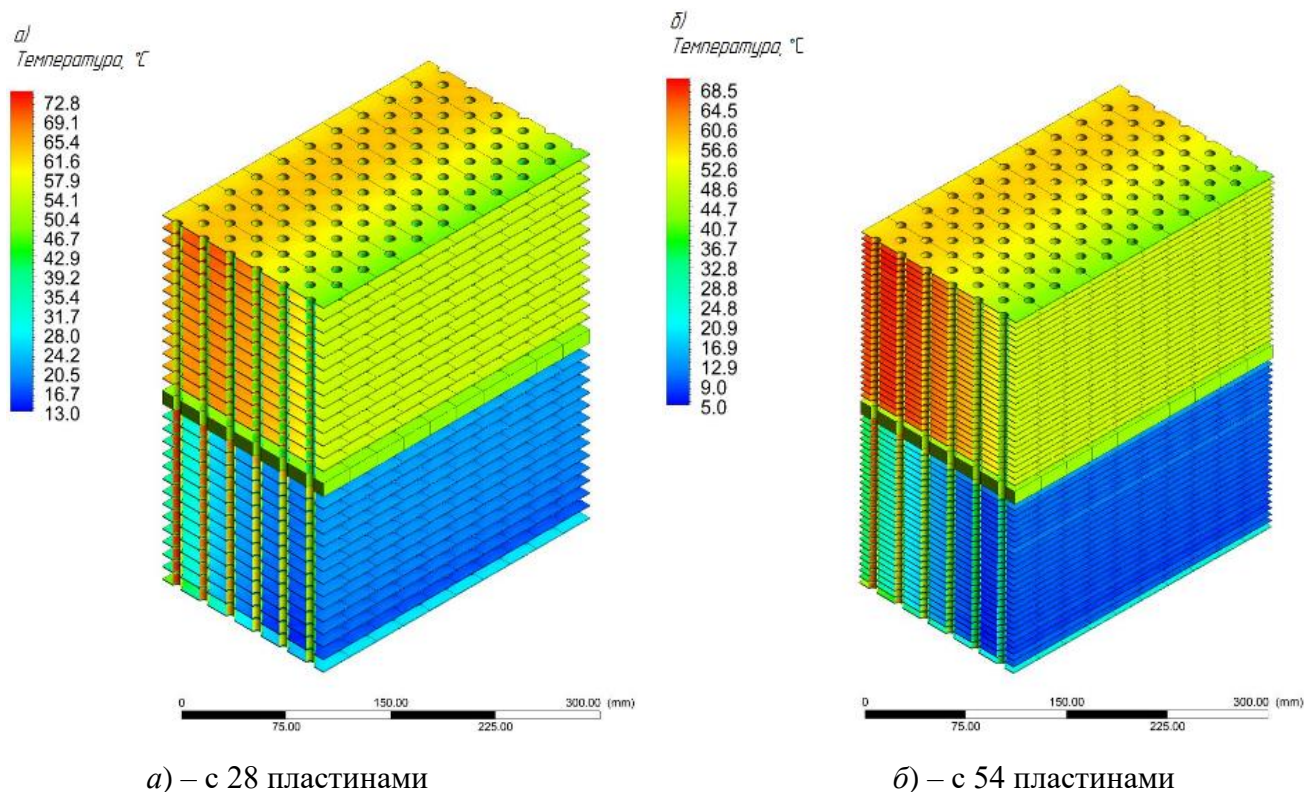


Рисунок 3 - Температурные поля теплоутилизаторов:

Таблица 2 – Результаты моделирования теплоутилизатора

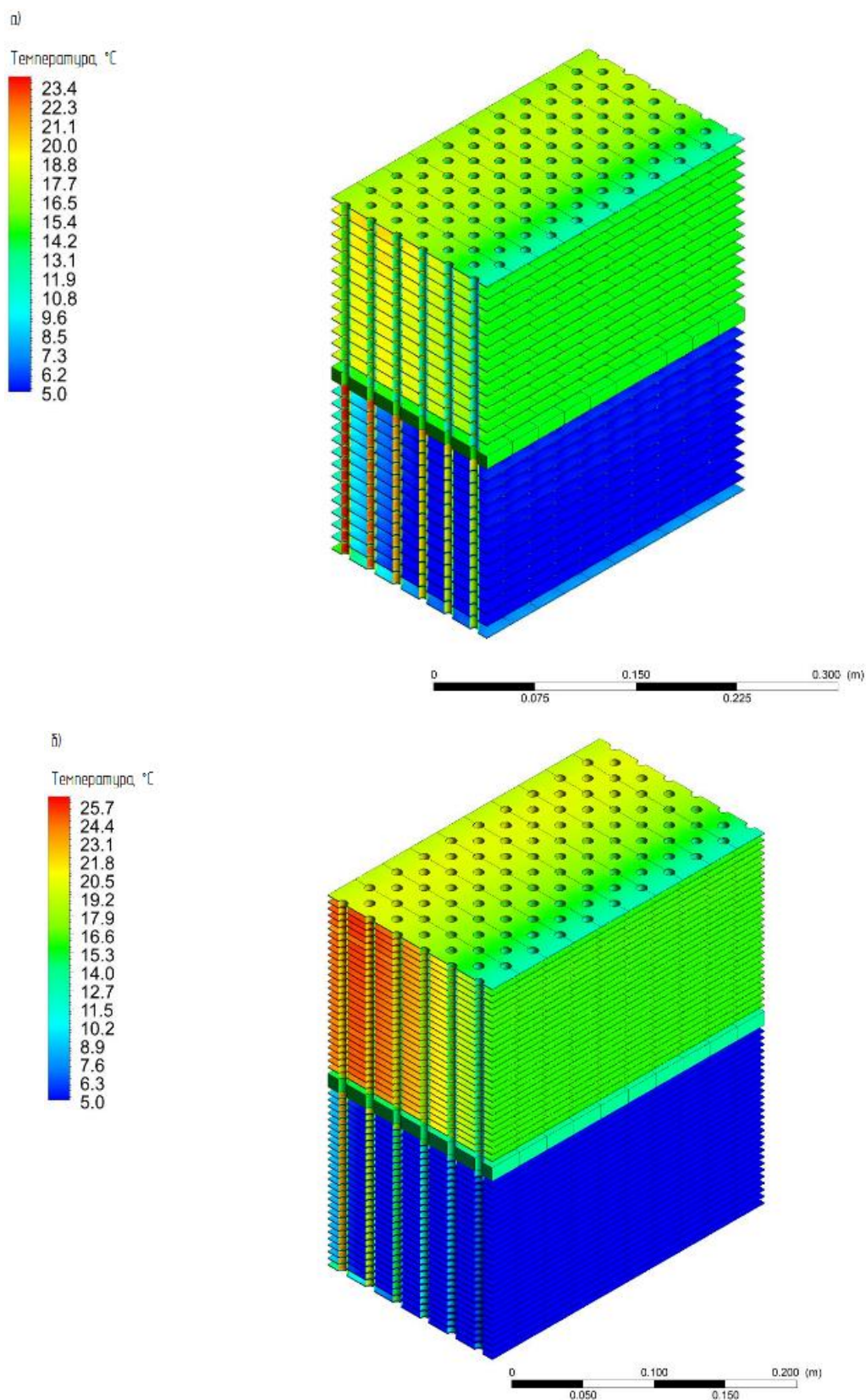
№ измерения	Средние значения температуры среды в экспериментальных точках, °C						Массовый расход приточного воздуха $G_{M1}$ , кг/ч	Массовый расход вытяжного воздуха $G_{M2}$ , кг/ч
	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5	т.6		
28 теплообменных пластин								
1	65,2	46,6	54,5	27,1	74,7	41,7	454,2	328,0
2	62,9	59,1	63,1	50,1	72,6	57,0	421,9	306,0
54 теплообменные пластины								
1	66,7	63	36,7	26,5	68,6	49,5	451,2	325,0
2	67,7	66,7	55,5	52,0	68,8	61,3	419,4	293,0

Примечание: Экспериментальные точки указаны на рис. 2.

На основе полученных данных были определены тепловые потоки в теплообменниках обеих конструкций, необходимые для постановки задачи математического моделирования утилизации теплоты вентиляционных выбросов при параметрах потоков воздуха по ГОСТ Р ЕН 308:

- температура наружного воздуха - плюс 5 °С;
- температура вытяжного воздуха - плюс 25 °С.

В результате численного анализа получены термограммы распределения температурных полей (рис. 4). Значения температур и расходов воздуха представлены в *табл. 3*.



а) – с 28 пластинами,      б) – с 54 пластинами

Рисунок 4 - Температурные поля теплоутилизаторов системы вентиляции:

Таблица 3 – Результаты расчёта теплоутилизаторов для систем вентиляции

Средние значения температуры среды в экспериментальных точках, °С						Массовый расход приточного воздуха $G_{M1}$ , кг/ч	Массовый расход вытяжного воздуха $G_{M2}$ , кг/ч
т.1	т.2	т.3	т.4	т.5	т.6		
28 теплообменных пластин							
21,4	19,0	19,7	5,0	25,0	9,9	490,2	453,0
54 теплообменные пластины							
23,4	18,4	13,5	5,0	25,0	15,7	490,2	456,0

Полученные результаты численного анализа теплообменника с тепловыми трубами позволили определить по методике, рассмотренной в [1], тепловую эффективность утилизатора с тепловыми трубами по зависимости:

$$\varepsilon = \frac{W_2 (t_2'' - t_2')}{W_1 (t_1' - t_2')}$$

где  $t_1'$  – температура удаляемого воздуха на входе, °С;  $t_2''$  – температура нагреваемого воздуха на выходе, °С;  $t_2'$  – температура нагреваемого (холодного) воздуха на входе, °С;  $W_2$  – водяной эквивалент нагреваемого воздуха, Вт/°С;  $W_1$  – водяной эквивалент охлаждаемого воздуха, Вт/°С.

По результатам расчета тепловая эффективность теплоутилизатора с 28 пластинами при которых шаг между теплообменными пластинами составляет 10 мм – 26,5 %, с 54 пластинами при которых шаг между теплообменными пластинами составляет 5 мм – 57,5 %. Таким образом, увеличение количества пластин с соответствующим уменьшение шага оребрения тепловых труб в 2 раза, увеличивает эффективность устройства в 2,17 раза. При этом аэродинамического сопротивление теплообменников увеличивается с 38 до 55 Па.

Результаты моделирования работы теплообменников на тепловых трубах, показывают перспективу их применения для утилизации теплоты вентиляционных выбросов.

#### Библиографический список:

1. Васильев Л. Л. Теплообменники на тепловых трубах / Л. Л. Васильев. – Минск: Наука и техника, 1981. – 143 с.
2. Дан П. Д. Тепловые трубы / П. Д. Дан, Д. А. Рей; пер. Ю. А. Зейгарника. – Москва: Энергия, 1979. – 272 с.
3. Романова Е. В. Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребренного рекуператора / Е. В. Романова, А. Н. Колиух, Е. А. Лебедев // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – Тамбов: Вестник ТГТУ, 2017. – С. 430 – 427.
4. Сасин В. Я. Основы инженерных методов расчета тепловых труб / В. Я. Сасин, А. Я. Шелгинский // Труды МЭИ. – Москва: Изд-во МЭИ, 1974. Вып. 198. – С. 89 – 98.
5. Шелгинский А. Я. Тепловые трубы в системах теплоснабжения и утилизации ВЭР: учебное пособие / А. Я. Шелгинский. – Москва: Издательский дом МЭИ, 2006. – 60 с.

## АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

<b>А</b>			Кожевина К. Е.	125	Рыков П. Е.	67
Агеев А. Э.	30		Кокин Р. О.	46	<b>С</b>	
Андреев Д. И.	34		Коломинова М. В.	133	Савич В. Л.	78,
Андреев М. А.	34		Кочкин Н. В.	48		97, 99
Андреев С. А.	142		Круслякова Е. С.	7	Семяшкина Е. И.	9
<b>Б</b>			<b>Л</b>			
Базарова А. М.	7		Лазарева В. Г.	125	Скутина Е. В.	179, 182
Белкин И. А.	114		Лиджиев Б. С.	50	Смирнов Ю. Г.	122
Богданов Н. П.	83		<b>М</b>			
Бородулин А. М.	145		Малинин В. В.	90,	Сон Ян Пин	188
Булгаков В. Ю.	169			95, 97	Соходон Г. В.	130
Бурмистрова О. Н.	146,		Малинин В. Г.	87, 90,	Старинец М. В.	106, 110
	149, 155			97, 99	Старцев А. Э.	12, 16,
<b>В</b>			Малинин Г. В.	87, 95		19, 46
Вайник К. В.	12		Малинина Н. А.	87,	<b>Т</b>	
Выборов В. А.	149			90, 99	Телицын Е. И.	70
Вычерова Н. Р.	151		Меньшиков С. В.	155	Тетеревлева Е. В.	14, 25,
<b>Г</b>			Миронюк А. В.	176		27, 30
Габова М. Н.	78		Михайленко Е. В.	136,	Тимофеев А. В.	191
Горбиков В. В.	154			162	Тимохов Р. С.	138, 142
Григорьева Т. А.	103		Моторина Н. П.	64	Тимохова О. М.	136, 138,
Грунской Т. В.	114		Мужикова А. В.	78		142, 151
<b>Д</b>			Мучкинова Л. И.	50	Тихомирова К. С.	119
Девальтовский Е. Э.	179,		<b>О</b>			
	182		Отев К. С.	27, 50,	Тропин Д. И.	53
Демина М. Ю.	83			53, 97, 99	<b>У</b>	
Джин Хевэй	188		<b>П</b>			
Димов А. А.	97		Петров М. В.	56	Ужицкий Е. А.	155
<b>З</b>			Пильник Ю. Н.	146	Уляшев А. Е.	16
Замилов А. А.	39		Пискайкина М. М.	117	Уляшева В. М.	185
Засовская М. А.	106, 110		Полетаев С. В.	16, 21,	<b>Ч</b>	
<b>И</b>				43, 70	Чемшикова Ю. М.	136
Иванова Е. С.	172		Полетаева С. Н.	14	Черевань В. С.	165
Ивенина И. В.	122		Поликарпова М. В.	119	Чукилев А. Е.	19
Ильин Е. А.	185		Пономарев Н. С.	188	<b>Ш</b>	
<b>К</b>			Пухкал В. А.	169	Шакирзянов Д. И.	138
Карабанов Б. Д.	21		<b>Р</b>			
Каргин К. А.	43		Романовский С. Е.	59	<b>Щ</b>	
					Щетинин Е. В.	74
					<b>Я</b>	
					Яковлев В. А.	191