

На правах рукописи

Ю. Горин

Горин Юри Аркадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ
ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ БЕСКАНАЛЬНОЙ ПОДВОДНОЙ
ПРОКЛАДКОЙ ТЕПЛОПРОВОДОВ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Йошкар-Ола – 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет» на кафедре «Энергообеспечение предприятий»

**Научный
руководитель:**

кандидат технических наук, профессор
Чемоданов Александр Николаевич

**Официальные
оппоненты:**

Панферов Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный
университет (национальный исследовательский
университет)», профессор кафедры «Информаци-
онно-аналитическое обеспечение управления в со-
циальных и экономических системах»

Половников Вячеслав Юрьевич
кандидат технических наук,
ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский
Томский политехнический университет», доцент
Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Инженерной школы энергетики

**Ведущая
организация:**

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтя-
ной технический университет», г. Уфа

Защита диссертации состоится «22» июня 2021 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.082.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», по адресу: 420066, Казань, ул. Красносельская, д. 51, ауд. Д-224, тел/факс (843) 519-42-55.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, с указанием контактных данных и заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 420066, г. Казань, ул. Красносельская, 51, КГЭУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.082.06.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Казанского государственного энергетического университета на официальном сайте КГЭУ <https://kgeu.ru/Diss/Dissertant/273?idDiss=116>

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Ш.Г. Зиганшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Развитие теплоснабжения в нашей стране ориентировано на создание крупных систем централизованного теплоснабжения. Российская система теплоснабжения является самой большой в мире и включает в себя более 50 тыс. локальных систем теплоснабжения. В состав источников тепла входят около 585 ТЭЦ, более 3000 отопительных котельных производительностью выше 20 Гкал/ч. Система транспорта тепловой энергии и теплоносителя от источников тепла до потребителя является составной частью энергетических систем и комплексов. Суммарная протяженность тепловых сетей составляет свыше 177 тыс. км в двухтрубном исполнении.

Для оценки эффективности энергетических систем применяют более тридцати показателей, важнейшим из которых является коэффициент использования установленной мощности (КИУМ). В России КИУМ для ТЭЦ равен 30 %, для отопительных котельных 13-15 %; в США КИУМ для ТЭЦ равен 42,5 %. В частности, массовое строительство многоквартирных домов с поквартирным отоплением от автономных газовых котлов в зонах централизованного теплоснабжения предопределило неостребованность ранее запроектированных под эту нагрузку и построенных централизованных источников тепла. В связи с этим наиболее действенным способом повышения КИУМ является развитие тепловых сетей и переключение потребителей с существующих малоэффективных квартальных и объектовых отопительных котельных на крупную энергетическую систему, а также организация оперативных связей между локальными системами теплоснабжения с целью оптимального перераспределения подключенной тепловой нагрузки между ними в период минимума и максимума несения нагрузки. При этом экономическую обоснованность мероприятия необходимо подтвердить расчетом эффективности инвестиций в проект.

В настоящее время уровень конструирования и строительства тепловых сетей не соответствует в достаточной мере современным требованиям. Медленно внедряются прогрессивные конструкции и промышленные методы прокладки теплопроводов. В частности, так как подавляющее большинство населенных пунктов располагается по берегам различных водоемов, требует решения техническая задача преодоления теплопроводами водоемов. Известные способы пересечения водных преград (дюкер, мост) являются технически сложными сооружениями, требующими значительных материальных и трудовых ресурсов. Отсутствует надежная, простая, экономичная конструкция бесканальной прокладки теплопроводов по дну водоема. Это оказывается сдерживающим фактором развития тепловых сетей и, следовательно, повышения эффективности системы теплоснабжения в целом.

В настоящее время для тепловой изоляции трубопроводов применяются различные по своей природе и назначению материалы и изделия, в том числе композиты. При этом отсутствуют исследования физико-механических характеристик новых теплоизоляционно-балластных композитов (ТБК) в составе трубной конструкции, обладающих нормируемыми теплоизоляционными, балластными и прочностными свойствами для прокладки теплопроводов бесканально по дну водоема.

Таким образом, разработка новых энерго- и ресурсосберегающих технических решений при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах с целью повышения их эффективности является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследований. Исследованиям в области оценки эффективности энергетических систем посвящены труды Б. П. Варнавского, В. Е. Аракелова, Е. Г. Гашо, Ж. Р. Кузнецовой и др. В работах названных авторов отмечено, что задача оценки эффективности энергетических систем по причине их многогранности остается не решенной в полной мере.

Разработке конструкций подземной и надземной прокладки теплопроводов посвящены исследования Е. Я. Соколова, В. И. Манюка, А. А. Николаева, Р. В. Щекина, И. Г. Староверова, Е. М. Авдолимова, Ю. М. Варфоломеева, А. А. Ионина, Н. К. Громова, Г. Х. Умеркина и др.

Большой вклад в разработку материалов рациональной тепловой защиты тепловых сетей и оборудования в разные годы внесли ученые: Е. Я. Соколов, Е. П. Шубин, С. В. Хижняков, В. В. Гурьев, В. П. Витальев, Б. М. Шойхет, Ю. М. Хлебалин, Л. В. Ставрицкая, Ю. Е. Николаев и др.

Подводный вид прокладки широко применяется для магистральных газопроводов и нефтепроводов. В трудах П. П. Бородавкина, О. Б. Шадрина, Ф. М. Мустафина, Л. И. Быкова изложены способы проектирования, выбор оптимальных вариантов и конструктивных решений подводных переходов магистральных трубопроводов через водные преграды.

Однако следует отметить, что неизученным остается способ преодоления водных преград теплопроводами бесканально в траншее по дну водоема и не разработана трубная конструкция для этого вида прокладки.

Объектом исследования являются транспортные системы теплоты и теплоносителей в энергетических системах и комплексах.

Предметом исследования служит способ повышения эффективности энергетических систем и комплексов, заключающийся в разработке энерго- и ресурсосберегающей трубной конструкции для сооружения переходов теплопроводов через водные преграды.

Цель работы и задачи исследований. Целью работы является повышение эффективности энергетических систем и комплексов путем разработки энерго- и ресурсосберегающей конструкции пересечения водных преград трубопроводами для транспортировки теплоты и теплоносителей.

Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи исследования:

1. Выполнить аналитический обзор основных показателей эффективности энергетических систем и способов их повышения в части, касающейся развития систем транспорта теплоты и теплоносителей.

2. Проанализировать способы пересечения теплопроводами водных преград. Выполнить анализ физико-механических свойств теплоизоляционных материалов с целью возможности их применения для бесканальной прокладки теплопроводов в траншее по дну водной преграды.

3. Разработать и теоретически обосновать конструкцию бесканальной подводной прокладки теплопроводов систем теплоснабжения.

4. Экспериментально исследовать физико-механические характеристики конструкции подводного теплопровода систем теплоснабжения.

5. Выполнить оценку основных технико-экономических и инвестиционных показателей применения разработанной трубопроводной конструкции прокладки теплопроводов.

6. Разработать и обосновать предложения по повышению эффективности системы теплоснабжения г. Йошкар-Олы за счет применения разработанной трубной конструкции.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Основные результаты диссертационной работы соответствуют п. 5 «Разработка и исследование в области энергосбережения и ресурсосбережения при производстве тепловой и электрической энергии, при транспортировке теплоты и энергоносителей в энергетических системах и комплексах» и п. 6 «Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования» паспорта специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы.

Научная новизна результатов исследования состоит в том, что впервые разработана трубная конструкция для прокладки теплопроводов энергетических систем в траншее по дну водоема, определены ее физико-механические свойства. Полученные в результате экспериментальных исследований свойства уравнения регрессии позволяют прогнозировать характеристики конструкции. Новизна разработанных технических решений подтверждена патентами РФ.

Теоретическая значимость результатов работы заключается в том, что полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований в дальнейшем могут быть использованы для моделирования физико-механических характеристик трубной конструкции в составе энергетической системы при пересечении водных преград.

Практическая значимость работы. Разработанная трубная конструкция расширяет способы решения технической задачи сооружения переходов через водные преграды теплопроводами систем централизованного теплоснабжения. Использование результатов исследования позволяет повысить инвестиционные показатели и энергоэффективность проектируемых и существующих систем теплоснабжения. Основные положения и результаты приняты к внедрению ООО «МТсК» и БТПИ «Марийскгражданпроект», а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет».

Достоверность и обоснованность результатов исследований. Достоверность подтверждается лабораторными испытаниями на современном поверженном оборудовании с использованием стандартизированных методик, применением современных методов обработки и визуализации экспериментальных данных с помощью пакета программ MSOffice 2013, Компас-3D V13, Mathcad.

Методология и методы исследования. В процессе исследования использованы методы математического моделирования, математического планирования экспериментальных исследований, теории вероятности и математической статистики. Теоретические исследования базируются на теории общей проводимости, теории теплопроводности.

Личный вклад. Участие автора состоит в разработке основных идей диссертации, в постановке и решении задач теоретического, экспериментального и прикладного характера. Автору принадлежат основные идеи опубликованных в соавторстве статей и полученных патентов.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Трубная конструкция, обладающая нормируемыми физико-механическими характеристиками для бесканальной подводной прокладки теплопроводов энергетических систем.

2. Результаты экспериментальных исследований в виде уравнений регрессии, позволяющих определить рациональные физико-механические свойства трубной конструкции.

3. Оценка влияния применения трубной конструкции на инвестиционные показатели и энергоэффективность системы теплоснабжения на примере г. Йошкар-Олы.

Апробация работы. Основные положения работы и материалы отдельных разделов докладывались, обсуждались и получили одобрение на всероссийской междисциплинарной научной конференции с международным участием «Вавиловские чтения» (Йошкар-Ола, 2010-2014 гг.); международной учебно-научно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2012» (Уфа, 2012 г.); IX Международной учебно-практической конференции «Трубопроводный транспорт – 2013» (Уфа, 2013 г.); международной научно-практической Интернет-конференции

«Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012»; международной научно-практической Интернет-конференции «Исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2013»; Международной научно-технической конференции «Smart Energy Systems 2019» (Казань, 2019 г.)

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 22 печатных работах, в том числе: 1 статья в журнале, индексируемом в международной базе SCOPUS; 8 – в изданиях, входящих в перечень ВАК (в том числе 2 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК по специальности диссертации); 1 патент на изобретение № 2544194; 3 патента на полезную модель № 122746, № 132895, № 136518 и 9 публикаций в материалах международных, всероссийских, региональных конференций и прочих изданиях.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (114 наименований) и приложений. Объем работы включает в себя 169 страниц машинописного текста, 42 иллюстрации, 50 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены структура и классификация энергетических систем, выполнен анализ способов повышения эффективности систем теплоснабжения. Отмечено, что в связи с многоаспектностью эффективности энергосистем задача их оценки является в полной мере нерешенной. Содержится анализ применяемых современных теплоизоляционных материалов для теплопроводов. Установлено, что их применение в трубной конструкции возможно только с дополнительной балластировкой, значительно повышающей затраты на капитальное строительство. Выполнен обзор способов пересечения теплопроводами водных преград, выявлены их преимущества и недостатки. Показано, что стоимость сооружения переходов значительно превышает стоимость сооружения линейной части. Отмечено, что исследования в области совершенствования технических решений при транспортировке теплоты и энергоносителей в составе энергетических систем и комплексов, в частности при пересечении водных преград, направленных на энерго- и ресурсосбережение, сохраняют актуальность по причинам сложности объекта исследования и непрерывной потребности в углублении изучаемой сферы.

Во второй главе сформулированы требования, предъявляемые к трубной конструкции. Предложена конструкция, состоящая из рабочей стальной трубы, помещенной в защитную полиэтиленовую оболочку с заполнением межтрубного пространства ТБК, обладающим необходимыми теплоизоляционными и балластными свойствами (рис. 1).



Рис. 1. Трубная конструкция

С учетом типоразмера выпускаемых промышленностью стальных (по ГОСТ 10704-91) и полиэтиленовых (по ГОСТ 18599-2001) труб составлен сортамент конструкции.

ТБК состоит из портландцемента, барита и древесных частиц. Портландцемент является связующим между компонентами (плотность $\rho = 4700 \text{ кг/м}^3$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,47 \text{ Вт/(м*К)}$). Применение барита в качестве балластирующего наполнителя обусловлено его высокой плотностью ($\rho = 4700 \text{ кг/м}^3$, $\lambda = 1,7 \text{ Вт/(м*К)}$). Древесные частицы, имеющие коэффициент теплопроводности $\lambda \approx 0,09\text{--}0,17 \text{ Вт/(м*К)}$ и плотность $\rho = 200 \text{ кг/м}^3$, придают композиту необходимые теплоизоляционные свойства.

В рамках численного эксперимента выполнено исследование физико-механических свойств (плотность, коэффициент теплопроводности) конструкции. Известно, что устойчивость против всплытия единицы длины трубопровода с учетом коэффициента запаса устойчивости $k_{y.c.}$ определяется из условия

$$P_X \cdot k_{y.c.} \leq (mg - F_A - P_Y) f_{TP}. \quad (1)$$

Расчетная схема нагрузок и воздействий на подводный трубопровод в траншее представлена на рисунке 2.

Графически результаты теоретических исследований устойчивости конструкции против всплытия отображены на рисунке 3. Устойчивость против всплытия выявлена при D_y рабочей трубы $\geq 100 \text{ мм}$. При необходимости прокладки подводных трубопроводов D_y 50, 70, 80 мм требу-

ется дополнительная балластировка пригрузами весом более 16,73 Н/п.м, 11,32 Н/п.м, 7,99 Н/п.м соответственно.

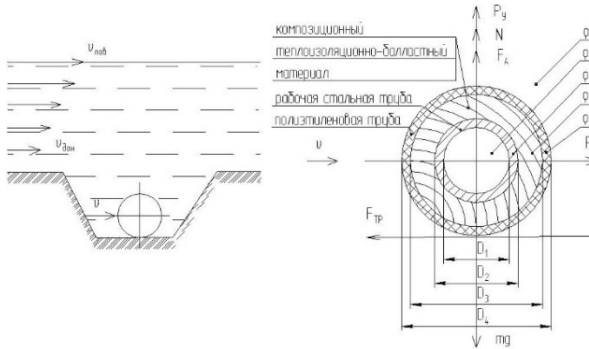


Рис. 2. Расчетная схема нагрузок и воздействий на подводный трубопровод в траншее: D_1, D_2, D_3, D_4 – внутренний и наружный диаметры стальной и полиэтиленовой трубы, м; $\rho, \rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_4$ – плотность воды водоема, теплоносителя, стали, ТБК, полиэтилена, кг/м^3 ; $v, v_{\text{пов}}, v_{\text{дон}}$ – скорость водного потока в траншее, на поверхности, у дна, м; $F_A, F_{\text{тр}}, N$ – сила Архимеда, реакции опоры, трения, Н

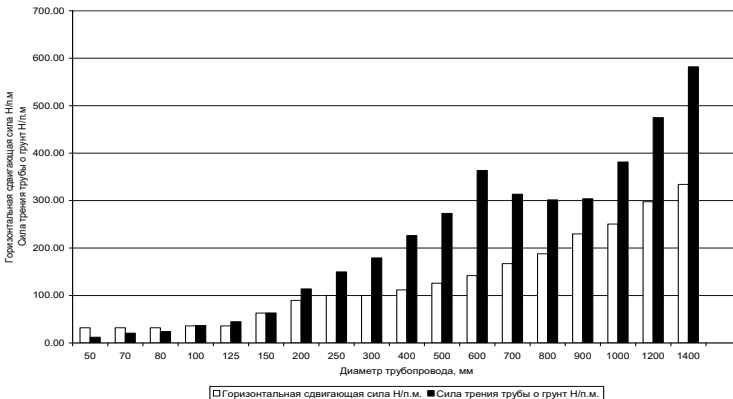


Рис. 3. Результаты исследований устойчивости трубопроводной конструкции против всплытия

Расчетная схема передачи тепла через многослойную стенку и массив грунта представлена на рисунке 4.

В общем случае для многослойной стенки трубы термическое сопротивление R , $(\text{м}^2\text{К})/\text{Вт}$ определяется по известной формуле

$$R = \frac{1}{\kappa} = \frac{1}{\alpha_1 D_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{D_{i-1}}{D_i}. \quad (2)$$

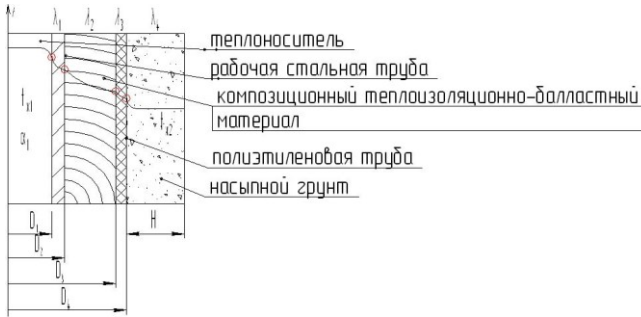


Рис. 4. Схема передачи тепла через многослойную стенку и массив грунта: $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ – коэффициент теплопроводности стали, ТБК, полиэтилена, грунта; D_1, D_2, D_3, D_4 – то же, что и на рис. 2; $t_{ж1}, t_{ж2}$ – температура теплоносителя, грунта; H – толщина засыпки

Теоретическое исследование эффективности теплоизоляционного материала базируется на теории обобщенной проводимости смесей. Случай шарообразных включений, равномерно введенных в сплошную матрицу, описан формулой Максвелла-Вагнера

$$\Lambda = \Lambda_M \frac{2\Lambda_M + \Lambda_B + 2\Theta_B(\Lambda_B - \Lambda_M)}{2\Lambda_M + \Lambda_B - \Theta_B(\Lambda_B - \Lambda_M)}, \quad (3)$$

где Λ_M – обобщенная проводимость субстанции (матрицы), в которую введены включения; Λ_B – обобщенная проводимость включений; Θ_B – относительная объемная концентрация включений в смеси.

С учетом того, что теплоизоляционный материал является трехкомпонентным, в котором связующее (портландцемент) и балластный наполнитель (барит) образуют его матрицу, а также K_{Π} – поправочного коэффициента, учитывающего пластинчатую, отличную от шарообразной, форму включений теплоизоляционного наполнителя, формулу коэффициента теплопроводности можно представить в следующем виде:

$$\lambda_{\text{комп}} = K_{\Pi} \lambda_M \frac{2\lambda_M + \lambda_3 + 2 \frac{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_{\text{комп}}}{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_3} (\lambda_3 - \lambda_M)}{2\lambda_M + \lambda_3 - \frac{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_{\text{комп}}}{\rho_1 + \rho_2 - 2\rho_3} (\lambda_3 - \lambda_M)}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{комп}}, \lambda_M, \lambda_3$ – коэффициенты теплопроводности композита, матрицы, теплоизоляционного наполнителя, Вт/(м*К); $\rho_{\text{комп}}, \rho_1, \rho_2, \rho_3$ – плотность композита, связующего, балластного наполнителя, теплоизоляционного наполнителя, кг/м³.

В результате численного решения формулы (4) для стандартизированных характеристик арболита, являющегося однотипным с разработанным цементно-древесным композитом (плотность $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$ и коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,17 \text{ Вт/(м·К)}$), получен поправочный коэффициент $K_n = 0,597$.

Исследования тепловых потерь разработанной конструкции выполнены с использованием программы Microsoft Office Excel. Его результаты сопоставлены с нормируемыми значениями удельных тепловых потерь по СП 61.13330.2012 среднегодовыми часовыми удельными потерями тепловой энергии для трубопроводов двухтрубных водяных сетей при подземной, бесканальной прокладке (рис. 5).



Рис. 5. Среднегодовые часовые удельные потери тепловой энергии, Вт/м

Проведенные теоретические исследования показывают, что теплоизоляционные характеристики разработанной конструкции не превышают нормативных значений по теплозащите трубопроводов с условным диаметром рабочей трубы $D_y 200 \text{ мм}$ включительно и более. Применение данной теплоизоляции для трубопроводов диаметром менее $D_y 200 \text{ мм}$ возможно путем увеличения толщины изоляции

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств трубной конструкции.

На первом этапе исследований изготовлено 10 экспериментальных образцов кубической формы размерами $150 \times 150 \times 150 \text{ мм}$. Компонент-

ный состав образцов: портландцемент марки М400 по ГОСТ 31108-2003, барит по ГОСТ 3158-75, станочная стружка фракции 0,5-20 мм, вода по ГОСТ 23732-79 в соотношении 1:2:4:1,3

Теплофизические свойства экспериментальных образцов определены методом измерения плотности тепловых потоков на экспериментальной установке (рис. 6)

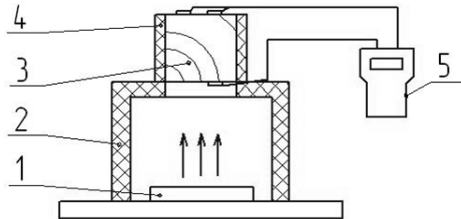


Рис. 6 Схема установки для определения плотности тепловых потоков: 1 – нагревательный элемент; 2 – изотермический контейнер; 3 – исследуемый образец; 4 – боковое теплоизоляционное покрытие образца; 5 – измеритель тепловых потоков ИТП-МГ4 «ПОТОК» с датчиками тепловых потоков и температуры

Определение прочности выполнено измерением минимальных усилий, разрушающих контрольные образцы материала при их статическом нагружении. Для проведения испытаний применена поверенная разрывная испытательная машина Р-10.

Методом планирования эксперимента определены статистические показатели, необходимые для основного этапа экспериментальных исследований и обработки результатов. Для упрощения дальнейших исследований и расчетов приняты следующие допущения: соотношение компонентов определено в объемном исчислении; объемное соотношение портландцемента принято постоянным и равным единице; количество воды определяется коэффициентом водоцементного отношения, при котором достигается нормированная для бетонов консистенция по ГОСТ 10181-62.

При проведении основного этапа эксперимента исследованы физико-механические свойства (плотность, коэффициент теплопроводности, предел прочности на сжатие) ТБК (рис. 6).

В результате экспериментальных исследований выявлены следующие физико-механические характеристики, удовлетворяющие предъявляемым требованиям по устойчивости против всплытия, теплоизоляционным и прочностным свойствам трубной конструкции: плотность $\rho = 1090,593 \div 1433,852 \text{ кг/м}^3$; коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,17 \div 0,248 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; предел прочности на сжатие $\sigma_b = 8,3 \div 18,49 \text{ МПа}$.

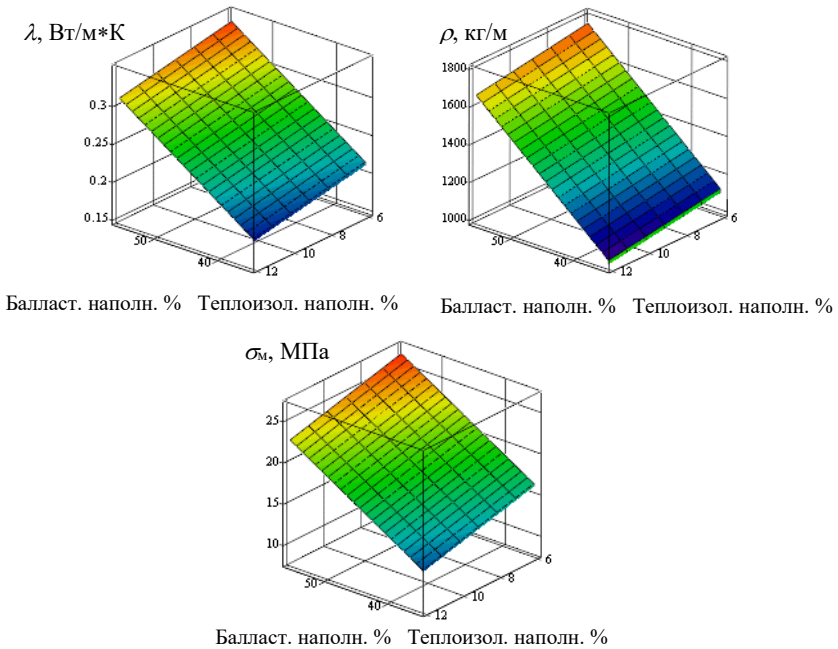


Рис. 6. Результаты экспериментальных исследований физико-механических свойств (плотность, коэффициент теплопроводности, предел прочности на сжатие)

Сопоставлением полученных результатов теоретических и экспериментальных исследований определен поправочный коэффициент K_n к определению коэффициента теплопроводности по теории обобщенной проводимости (формуле (4)). Средний поправочный коэффициент к формуле Максвелла-Вагнера для ТБК с исследованным соотношением компонентов равен 0,654. Среднее относительное отклонение не превышает 10 %. Относительное отклонение полученного поправочного коэффициента от K_n для арболита, определенного во второй главе, составляет 8,7 %. Что подтверждает справедливость выдвинутой гипотезы о необходимости применения поправки к формуле Максвелла-Вагнера, учитывающей отличную от шарообразной форму включений в матрицу композита.

Выполнено математическое описание основных физико-механических характеристик методом полного факторного эксперимента.

Переменными факторами являются доля содержания балластного наполнителя (барита) X_1 , %, и доля содержания теплоизоляционного наполнителя (древесных частиц) X_2 , %.

1. Плотность, кг/м^3 ,

$$Y_1 = 1609,5 + 303 X_1 - 162,5 X_2. \quad (5)$$

2. Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) ,

$$Y_2 = 0,35 + 0,06 X_1 - 0,05 X_2. \quad (6)$$

3. Предел прочности на сжатие, МПа,

$$Y_3 = 33,22 + 4,79 X_1 - 6,15 X_2. \quad (7)$$

Полученные математические зависимости позволяют прогнозировать выходные величины физико-механических свойств ТБК в пределах варьирования доли балластного наполнителя (барита) 35-56 масс. %; теплоизоляционного наполнителя (древесных частиц) 6-12 масс. %.

В четвертой главе определена себестоимость производства трубной конструкции, предложены технологическая схема изготовления и технология выполнения строительно-монтажных работ, приведена оценка эффективности инвестиционно-строительных проектов. Правильный выбор эффективного варианта из нескольких инвестиционных проектов оказывает влияние на технико-экономические показатели энергетической системы в целом.

Затраты на производство ТБК с учетом стоимости сырья, материалов, электроэнергии, машин и механизмов, заработной платы, плановых накоплений составляет 11050 руб/м³. Для сравнения: стоимость производства современных теплоизоляционных материалов следующая: пенополиуретана – 19491,82 руб/м³, минеральной ваты URSA – 1041,67 руб/м³. При этом следует отметить, что ни один из известных теплоизоляционных материалов не совмещает теплоизоляционные и балластирующие свойства, и поэтому не может быть использован для подводной прокладки теплопроводов без применения балластного материала, значительно увеличивающего стоимость трубной конструкции. Сравнение стоимости материалов трубопроводной конструкции с различными видами теплоизоляционного материала и балластировки на примере рабочей стальной трубы Ø 530×8 мм с внешней защитной полиэтиленовой оболочкой Ø710×12,5 мм представлено в табл. 1.

Таблица 1. Стоимость материалов трубопроводной конструкции $D_y = 500$ мм с различными видами теплоизоляционного материала (руб/п.м.)

Теплоизоляционный материал	Труба стальная 530×8 мм	Труба полиэтилен. 710×12,5 мм	Тепловая изоляция $V=0,122\text{м}^3$	Балластировка УЧК – 500 масса 450 кг, шаг 4 м	Итого
Пенополиуретан	3656,34	858,70	2378,00	3937,50	10830,54
Минеральная вата URSA	3656,34	858,70	127,08	3937,50	8579,62
ТБК	3656,34	858,70	1348,10	-	5863,14

Основные показатели инвестиционной привлекательности – индекс доходности, чистый доход, чистый дисконтированный доход – свидетельствуют об экономической эффективности производства разработанной трубной конструкции. Срок окупаемости составляет 3,65 года. Затраты на материалы при применении ТБК являются наименьшими.

Выявлена эффективность применения конструкции подводного перехода 2Ду400 мм протяженностью 132 м через р. М. Кокшага в г. Йошкар-Оле. Определены три варианта сооружения перехода через реку – возведение мостовой конструкции, прокладка дюкера и бесканальная прокладка в траншее по дну водоема. Рассчитаны капитальные вложения по каждому варианту с учетом затрат на подземную бесканальную прокладку от врезки в тепломагистраль М-2А до берега реки 2Ду400 мм протяженностью 984 м. Расходная часть проекта включает в себя ежегодные затраты на электроэнергию, топливо и потери тепла через изоляцию при транспортировке. Срок окупаемости инвестиционно-строительного проекта по варианту сооружения с применением разработанной конструкции является наименьшим (табл. 2).

Таблица 2. Инвестиционно-строительные показатели проекта по трем вариантам сооружения перехода р. М. Кокшага г. Йошкар-Олы, тыс. руб.

Показатели	Мостовая конструкция	Дюкер	Бесканальный переход
Инвестиции на строительство тепловой сети	28644,3	54995,0	20545,1
Ежегодные расходы	16768,58	16757,88	16768,18
Ежегодный доход	31984,74	31984,74	31984,74
Ежегодная прибыль	15216,16	15226,86	15216,56
Срок окупаемости инвестиций, год	1,9	3,6	1,4
Трудозатраты, чел.-ч.	13265,0	37852,4	11678,2

Выявлено влияние инвестиционного проекта с применением трубной конструкции на показатели эффективности системы теплоснабжения ОК № 37 «Заречная» г. Йошкар-Олы. Основой анализа повышения эффективности энергетической системы являются целевые показатели эффективности котельной за 2018 год. Согласно распоряжениям Главы администрации г. Йошкар-Олы о включении и отключении системы отопления объектов города, продолжительность отопительного сезона составила 216 суток. Средняя температура наружного воздуха за отопительный сезон, по данным Республиканского гидрометцентра, – минус 5,7 °С. Количество выработанной тепловой энергии за 2018 год составило 305 523,5 Гкал/год, или 58,9 Гкал/ч. Установленная мощность 212,2 Гкал/час. Подключенная нагрузка принята по заключенным договорам с потребителями, величина потерь и затрат тепловой энергии на

собственные нужды принята по нормативам. Результаты технико-экономического расчета показали целесообразность применения разработанной конструкции (табл. 3).

Таблица 3. Показатели эффективности ОК №37 «Заречная» при реализации инвестиционного проекта с применением разработанной конструкции

Показатель	Отпуск тепловой энергии, Гкал/ч	Коэффициент использования установленной мощности K_v
Факт базового 2018 г.	58,9	27,76
С учетом перспективы подключения м-на «Прибрежный»	61,2	28,84

В результате реализации проекта отпуск тепловой энергии увеличится на 3,9 %, коэффициент использования установленной мощности источника тепла повысится на 1,08 %, прибыль возрастет на 15,2 млн руб/год. При этом затраты на реализацию предложенного технического решения перехода теплопроводами через водную преграду из трех рассмотренных вариантов инвестиционных проектов являются минимальными.

В приложениях к работе приведены расчеты статистической обработки экспериментальных данных, патенты, акты внедрения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана обладающая новизной трубная конструкция с нормируемыми физико-механическими характеристиками для бесканальной подводной прокладки теплопроводов энергетических систем, состоящая из рабочей стальной трубы, помещенной в защитную полиэтиленовую оболочку с заполнением межтрубного пространства ТБК. Приоритет подтвержден патентами РФ № 2544194, ПМ № 122746, ПМ 136518, ПМ № 132895.

2. Проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств трубной конструкции и ТБК. Полученные результаты экспериментальных исследований в виде уравнений регрессии позволяют определить рациональные физико-механические свойства трубной конструкции. Определен оптимальный состав ТБК: портландцемент М400 – 17-25 масс.%, барит – 35-56 масс.%, древесная стружка – 6-12 масс. %, вода – 20-30 масс. %. Материал обладает следующими физико-механическими характеристиками: плотностью $\rho = 1090,593 \div 1433,852$ кг/м³, коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,17 \div 0,248$ Вт/(м*К), пределом прочности на сжатие $\sigma_{\text{в}} = 8,3 \div 18,49$ МПа.

3. Определены затраты на производство ТБК с учетом стоимости сырья, материалов, электроэнергии, машин и механизмов, заработной платы, плановых накоплений – 11050 руб/м³. Основные показатели инвестиционной привлекательности – индекс доходности, чистый доход, чистый дисконтированный доход, срок окупаемости инвестиций – свидетельствуют об экономической эффективности производства.

4. Проведена оценка влияния применения трубной конструкции на инвестиционные показатели и энергоэффективность системы теплоснабжения на примере г. Йошкар-Олы. Срок окупаемости инвестиционного проекта с применением разработанной конструкции из трех рассмотренных вариантов является наименьшим – 1,4 года. В результате реализации инвестиционно-строительного проекта с применением разработанной трубной конструкции повысится эффективность системы теплоснабжения ОК № 37 «Заречная» г. Йошкар-Олы: отпуск тепловой энергии увеличится на 3,9 %, коэффициент использования установленной мощности повысится на 1,08 %, прибыль возрастет на 15,2 млн руб/год.

5. Полученные результаты диссертационной работы целесообразно использовать на стадии проектирования систем транспорта теплоты и теплоносителей при выборе способа преодоления водных преград. Предложенный способ позволит улучшить финансово-экономические показатели систем теплоснабжения, повысит их инвестиционную привлекательность, что в свою очередь положительно скажется на эффективности энергетических систем на муниципальном и региональном уровнях.

Направлением дальнейшей разработки исследования диссертационной работы является исследование применения иных материалов для изготовления трубной конструкции.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Чемоданов, А. Н. Экспериментальные исследования композитного теплоизоляционно-балластного материала для подводных теплопроводов [Текст] / А. Н. Чемоданов, Ю. А. Горинов, Р. Г. Сафин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики / Казанский государственный энергетический университет. – Казань, 2014. – № 2-4. – С. 80-84.

2. Горинов, Ю. А. Оценка основных технико-экономических и инвестиционных показателей применения трубной конструкции для бесканальной подводной прокладки теплопроводов / Ю. А. Горинов // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2020. – Т. 12, № 4 (48). – С. 20-28.

В изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus:

1. *Gorinov, Y. A.* (Горинов, Ю. А.) Underwater Laying of Pipes for Heating Networks of Energy Systems (Подводная прокладка труб тепловых сетей энергосистем) // Journal E3S Web of Conferences (Журнал E3S Сеть конференций). – 2019. – № 12.

Патенты:

1. Патент РФ № 2544194 МПК С04В18/26. Композитный теплоизоляционно-балластный материал на основе древесных отходов / А. Н. Чемоданов, Ю. А. Горинов, Р. Г. Сафин, С. Я. Алибеков, Р. Х. Гайнуллин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет». – Заявка № 2014103401/03; заявл.31.01.2014; опубл. 10.03.2015, Бюл. № 7. – 5 с. ил.

2. Патент ПМ № 122746 РФ, МПК F16L59/02. Труба централизованного теплоснабжения для сооружения переходов через водные преграды / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Марийский государственный технический университет». – Заявка № 2012122952/28; заявл.04.06.2012; опубл.10.12.2012, Бюл. № 34. – 3с.ил.

3. Патент ПМ 136518 РФ, МПК F16L1/16. Конструкция подводного трубопровода централизованного теплоснабжения / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков, Р. Г. Сафин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Марийский государственный технический университет». – Заявка № 2012149976/06; заявл.22.11.2012; опубл.10.01.2014, Бюл. № 1. – 3с.ил.

4. Патент ПМ № 132895 РФ, МПК G01N27/10. Детектор системы оперативного дистанционного контроля состояния изоляции предварительно изолированных трубопроводов транспортировки тепловой энергии / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков, Р. Г. Сафин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Марийский государственный технический университет». – Заявка № 2013119276/28; заявл.25.04.2013; опубл.27.09.2013, Бюл. № 27. – 3 с. ил.

Труды в прочих изданиях:

1. Поздеев, А. Г. Арболитовая теплоизоляция подводных трубопроводов централизованного теплоснабжения [Текст] / А. Г. Поздеев, Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков, Э. Р. Хайруллина // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 4. – Казань. – С. 113-116.

2. *Горинов, Ю. А.* Прогнозирование свойств композитных теплоизоляционно-балластных материалов на основе древесных отходов [Текст] / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков, А. В. Маряшев,

Р. С. Сальманов // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 5. – Казань. – С. 75-79.

3. *Горинов, Ю. А.* Технология получения и расчет затрат на производство композитных теплоизоляционно-балластных материалов на основе древесных отходов [Текст] / *Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков, Р. С. Сальманов, Е. А. Ехлакова, А. В. Маряшев* // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2014. – Т. 17, № 8. – С. 103-105.

4. Чемоданов, А. Н. Применение арболита в качестве теплоизоляционно-балластного материала подводных трубопроводов централизованного теплоснабжения [Текст] / А. Н. Чемоданов, *Ю. А. Горинов*, Р. Г. Сафин, С. Я. Алибеков // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – 2014. № 3 (23). – С. 43-56.

5. Чемоданов, А. Н. Композитный теплоизоляционно-балластный материал на основе древесных отходов [Текст] / А. Н. Чемоданов, *Ю. А. Горинов*, Р. Г. Сафин // Безопасность жизнедеятельности. – Москва, 2015. – № 3. – С. 63-67.

6. *Горинов, Ю. А.* Исследование физико-механических свойств композиционных теплоизоляционно-балластных материалов на основе древесных отходов [Текст] / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков, Р. С. Сальманов, А. В. Маряшев // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2015. – Т. 18, №12. – С. 71-73.

7. *Горинов, Ю. А.* Оптимизация технологического процесса изготовления композиционных материалов на основе древесных отходов [Текст] / Ю. А. Горинов, С. Я. Алибеков, М. А. Агишева, Р. А. Шарафутдинов, А. В. Маряшев // Вестник Казанского технологического университета. – Казань, 2017. – Т. 20, № 22. – С. 34-36.

8. *Горинов, Ю. А.* Труба централизованного теплоснабжения для сооружения переходов через водные преграды [Текст] / Ю. А. Горинов // VIII Международная учебно-научно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2012» // Уфимский государственный нефтяной технический университет. – Уфа, 2012. – С. 399.

9. *Горинов, Ю. А.* Трубопровод централизованного теплоснабжения для переходов через водные преграды [Текст] / Ю. А. Горинов, С. Я. Алибеков, А. Н. Чемоданов // Международная научно-практическая Интернет-конференция «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012». – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-412/innovative-technologies-412/15765-412-0755>.

10. *Горинов, Ю. А.* Сооружение трубопроводов централизованного теплоснабжения для переходов через водные преграды [Текст] /

Ю. А. Горинов, С. Я. Алибеков, А. Н. Чемоданов // XVI Вавиловские чтения. Человек, общество, природа в эпоху глобальных трансформаций. Постоянно действующая Всероссийская междисциплинарная научная конференция с международным участием / Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2012. – С. 320-321.

11. *Горинов, Ю. А.* Определение теплотехнических свойств теплоизоляционных материалов для трубопроводов тепловых сетей [Текст] / Ю. А. Горинов, С. Я. Алибеков, А. Н. Чемоданов // XVI Вавиловские чтения. Человек, общество, природа в эпоху глобальных трансформаций. Постоянно действующая Всероссийская междисциплинарная научная конференция с международным участием / Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2012. – С. 321-322.

12. *Горинов, Ю. А.* Устойчивость подводных трубопроводов централизованного теплоснабжения [Текст] / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, Р. Г. Сафин, С. Я. Алибеков // Международная научно-практическая Интернет-конференция «Исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2013». – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-313/metals-and-energy-13/19484-313-1060>.

13. *Горинов, Ю. А.* Подводные теплопроводы [Текст] / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, В. В. Фоминых // XVII Вавиловские чтения. Человек, общество, природа в эпоху глобальных трансформаций: безопасность и развитие. Постоянно действующая Всероссийская междисциплинарная научная конференция с международным участием / Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола, 2013. – С. 307-308.

14. *Горинов, Ю. А.* Подводные трубопроводы централизованного теплоснабжения [Текст] / Ю. А. Горинов, А. Н. Чемоданов, С. Я. Алибеков, Р. Г. Сафин // IX Международная учебно-практическая конференция «Трубопроводный транспорт – 2013» / Уфимский нефтяной государственный институт. – Уфа, 2013. – С. 409.

15. Чемоданов, А. Н. Методика и результаты экспериментальных исследований свойств композитного теплоизоляционно-балластного материала на основе древесных отходов для подводных теплопроводов [Текст] / А. Н. Чемоданов, Ю. А. Горинов, Р. Х. Гайнуллин, Р. Х. Гайнуллин // Наука и мир: международный научный журнал: научное обозрение. – Волгоград, 2014. – № 2 (6). – С. 188-192.