

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Закирова Ильмира Асхатовна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ТОНКОПЛЕНЧНЫМ  
ПОКРЫТИЕМ ТЕПЛОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель

доктор химических наук,  
профессор Чичирова Н.Д.

Казань – 2019

|   |           |
|---|-----------|
| <b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>  | <b>7</b>  |
| <b>ГЛАВА 1. Анализ состояния проблемы повышения эффективности объектов распределенной энергетики – энерготехнологических комплексов и входящих в их состав систем теплоснабжения.....</b> | <b>17</b> |
| 1.1 Классификация энерготехнологических комплексов. Показатели оценки эффективности энерготехнологических комплексов.....   | 22        |
| 1.2 Тепловые потери при транспортировке и распределении тепловой энергии.....   | 23        |
| 1.3 Анализ существующих видов теплоизоляционных материалов, применяемых в системах теплоснабжения.....  | 28        |
| 1.3.1 Классификация теплоизоляционных материалов.....   | 30        |
| 1.4 Требования, предъявляемые при выборе теплоизоляционных конструкций трубопроводов систем теплоснабжения, согласно нормативной документации.....  | 35        |
| 1.5 Эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов, применяемых в системах теплоснабжения.....  | 37        |
| 1.6 Способы повышения эффективности применяемых теплоизоляционных конструкций в системах теплоснабжения.....  | 41        |
| 1.7 Теоретическое описание и математическое моделирование теплообменных процессов в теплоизоляционных конструкциях с применением тонкопленочного покрытия (ТПП).....                      | 43        |
| 1.7.1 Теплообменные процессы в волокнистых теплоизоляционных конструкциях.....  | 44        |
| 1.7.2 Внешние процессы, влияющие на теплообмен в теплоизоляционных конструкциях.....  | 50        |
| 1.7.3 Внутренние процессы, влияющие на теплообмен в теплоизоляционных конструкциях.....   | 58        |
| 1.8 Выводы и постановка задач.....  | 63        |
| <b>ГЛАВА 2. Экспериментальные исследования тепловых процессов в теплоизоляционной конструкции с ТПП.....</b>  | <b>65</b> |

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| 2.1       | Определение теплофизических свойств теплоизоляционной конструкции с ТПП.....  | 65 |
| 2.1.1     | Исследование теплопроводности теплоизоляционной конструкции с ТПП.....  | 65 |
| 2.1.1.1   | Методика проведения эксперимента.....   | 65 |
| 2.1.1.2   | Описание экспериментальных исследований.....  | 66 |
| 2.1.1.3   | Результаты и выводы.....  | 67 |
| 2.1.1.4   | Оценка погрешности измерений коэффициента теплопроводности.....   | 68 |
| 2.1.1.4.1 | Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в виде покровного слоя..... | 68 |
| 2.1.1.4.2 | Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в 1 слой.....          | 69 |
| 2.1.1.4.3 | Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в 2 слоя.....          | 70 |
| 2.1.1.4.4 | Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в 3 слоя.....          | 70 |
| 2.1.2     | Исследование теплового излучения теплоизоляционной конструкции с ТПП.....   | 71 |
| 2.1.2.1   | Методика проведения эксперимента.....   | 72 |
| 2.1.2.2   | Описание экспериментальных исследований.....  | 72 |
| 2.1.2.3   | Результаты и выводы.....  | 73 |
| 2.1.2.4   | Оценка погрешности измерений теплового излучения.....   | 75 |
| 2.1.2.4.1 | Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в нижней области измерений.....       | 75 |

|   |    |
|---|----|
| 2.1.2.4.2 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в боковой области измерений.....      | 76 |
| 2.1.2.4.3 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в верхней области измерений.....      | 77 |
| 2.1.2.4.4 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в нижней области измерений.....  | 77 |
| 2.1.2.4.5 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в боковой области измерений..... | 78 |
| 2.1.2.4.6 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в верхней области измерений..... | 79 |
| 2.1.3 Исследование воздухопроницаемости теплоизоляционной конструкции с нанесенным ТПП.....   | 79 |
| 2.1.3.1 Методика проведения эксперимента.....   | 80 |
| 2.1.3.2 Описание экспериментальных исследований.....  | 80 |
| 2.1.3.3 Результаты и выводы.....  | 81 |
| 2.1.3.4 Расчет погрешности косвенных измерений воздухопроницаемости теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП.....                           | 83 |
| 2.2 Определение эффективности применения ТПП на модельном участке поверхности трубопровода.....   | 84 |
| 2.2.1 Методика проведения эксперимента.....   | 84 |
| 2.2.2 Описание экспериментальных исследований.....  | 87 |
| 2.2.3 Результаты и выводы.....  | 89 |
| 2.2.4 Оценка погрешности измерений плотности тепловых потоков и температуры.....  | 89 |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.2.4.1 Расчет погрешности прямых измерений теплового потока теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика.....                | 89        |
| 2.2.4.2 Расчет погрешности прямых измерений температуры теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика.....                     | 90        |
| 2.2.4.3 Расчет погрешности прямых измерений теплового потока теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП.....           | 90        |
| 2.2.4.4 Расчет погрешности прямых измерений температуры теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП.....                | 91        |
| 2.2.4.5 Расчет погрешности косвенных измерений теплового сопротивления теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП..... | 92        |
| 2.3 Выводы по главе.....   | 93        |
| <b>ГЛАВА 3. Математическое моделирование тепловых процессов в тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с нанесенным ТПП.....</b>                  | <b>94</b> |
| 3.1 Постановка задачи, физическая картина тепловых процессов.....  | 94        |
| 3.2 Постановка задачи математического моделирования.....   | 97        |
| 3.3 Методика численного моделирования.....   | 101       |
| 3.3.1 Параметры численного моделирования.....  | 101       |
| 3.3.1.1 Параметры трубопровода.....  | 101       |
| 3.3.1.2 Параметры основного слоя изоляции трубопровода.....  | 101       |
| 3.3.1.3 Параметры покровного слоя изоляции.....  | 103       |
| 3.3.1.4 Гидродинамические характеристики внешнего обтекания.....   | 104       |
| 3.3.1.5 Оценка эффективности применения ТПП.....   | 105       |
| 3.3.2. Реализация численного метода моделирования.....   | 106       |
| 3.4 Результаты численного моделирования.....   | 108       |

|   |            |
|---|------------|
| 3.4.1 Обтекание в условиях естественной конвекции в помещении (техническом подполье, подвале и т.д.).....   | 109        |
| 3.4.1.1 Распределение полей температур и скоростей в условиях естественной конвекции в помещении (техническом подполье, подвале и т.д.).....  | 109        |
| 3.4.1.2 Оценка эффективности ТПП в условиях естественной конвекции.....   | 113        |
| 3.4.2 Обтекание в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе.....   | 116        |
| 3.4.2.1 Распределение полей температур и скоростей в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе.....  | 116        |
| 3.4.2.2 Оценка эффективности ТПП в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе.....  | 119        |
| 3.5 Выводы по главе.....  | 121        |
| <b>ГЛАВА 4. Экономическая эффективность практического применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения в составе энерготехнологического комплекса.</b>       | <b>123</b> |
| 4.1 Тепловизионная диагностика применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения в реальных условиях.....  | 123        |
| 4.2 Технико-экономическая оценка применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения поселка Осиново в составе энерготехнологического комплекса «Майский»..... | 125        |
| 4.3 Выводы по главе.....  | 139        |
| <b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>  | <b>142</b> |
| <b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ...144</b>   |            |
| <b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....145</b>  |            |
| <b>Приложения.....164</b>   |            |

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность работы

Распределенная энергетика – катализатор и ключевой элемент «энергетического перехода» от традиционной организации энергосистем XX века к новым технологиям и практикам XXI века. «Энергетический переход» осуществляется на базе децентрализации, цифровизации, интеллектуализации систем энергоснабжения, с активным вовлечением самих потребителей и всех видов энергетических ресурсов и характеризуется повышением энергетической эффективности и снижением выбросов парниковых газов [1].

Развитие распределенной энергетики в России позволит не только существенно снизить затраты на развитие сетевого комплекса и крупной генерации, способствуя сдерживанию роста цен на электроэнергию и расширению потребительского выбора, но и повысить энергоэффективность, снизить выбросы парниковых газов, повысить инвестиционную привлекательность энергетики, создать новые производства, рабочие места, центры спроса на инновации и условия для появления российских компаний – экспортеров новых технологий.

Опыт северных стран Европы показывает, что распределенную генерацию лучше развивать в совокупности с распределенным теплоснабжением, используя когенерацию – технологию совместного производства тепловой и электрической энергии в едином цикле. Распределенная когенерация в этих странах стала первым шагом на пути эффективной децентрализации энергосистем и, среди прочего, позволила снизить затраты на содержание магистральных сетей и устранить нерациональные потери энергии.

Так, в Дании система мер поддержки мини-ТЭЦ привела к появлению за 10-20 лет сотен небольших энергоцентров на природном газе и биомассе. По данным Danish Energy Agency, развитие распределенной когенерации снизило годовое потребление первичной энергии в Дании на 11% и уменьшило эмиссию CO<sub>2</sub> на 4,5 млн. тонн в год.

К технологиям распределенной энергетики в мировой практике относят широкий спектр технологий, включая: распределенную генерацию; управление спросом; управление энергоэффективностью и энергосбережением; микрогриды; распределенные системы хранения электроэнергии; электромобили. Базовое свойство всех этих технологий – близость к потребителю энергии.

Распределенная генерация – это совокупность электростанций, расположенных близко к месту потребления энергии и подключенных либо непосредственно к потребителю, либо к распределительной электрической сети. Тип используемого станцией источника первичной энергии, как и принадлежность станции к потребителю, генерирующей или сетевой компании, или третьему лицу не имеют значения [1].

Немаловажным аспектом развития распределенной энергетики является повышение энергоэффективности и энергосбережение, рассматриваемое как совокупность действий на стороне потребителя энергии, которые приводят к долгосрочному уменьшению его потребности в энергии, основанное на энергосберегающих мероприятиях, которые уменьшают потребность в энергии в моменты пиковых нагрузок энергосистемы и, соответственно, снижают потребности системы в установленной мощности электростанций.

Одним из типов распределенной генерации, приоритетным для российских условий, является энергоцентр для небольшого потребителя, представителя среднего или малого бизнеса, таких как тепличные комплексы, отели, сборочные цеха и т.д., где технология основана на принципе когенерации с применением газопоршневых установок. Актуальность и распространенность таких энергоцентров в России обусловлена климатическими особенностями страны и наличием устойчивого спроса на тепловую энергию практически во всех регионах.

Примером энерготехнологического комплекса (ЭТК), работающего на базе технологии когенерации является Энергоцентр «Майский». Подобными энергоцентрами оснащены свыше 35 крупнейших тепличных комплексов

России, таких как «Агрокомбинат «Южный», «Зеленая линия», «Агрокомбинат «Московский» и т.д.

Одной из актуальных и важных задач развития распределенной энергетики и энергосистемы страны в целом, является повышение надежности систем теплоснабжения (СТС). Российская СТС является самой большой в мире и состоит примерно из 50 тыс. локальных систем теплоснабжения, обслуживаемых 17 тыс. предприятий теплоснабжения [2-4].

Одной из проблем, влияющей на повышение потерь тепловой энергии при транспортировке, является неудовлетворительное состояние тепловой изоляции трубопроводов и оборудования СТС. Некачественная изоляция является косвенной причиной коррозионных процессов, приводящих к повреждениям трубных и теплообменных поверхностей с последующим образованием свищей и потерей теплоносителя.

На данный момент, в качестве тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей, а также в тепловых камерах после реконструкции и капитального ремонта, используются изделия на основе минерального волокна с защитным покрытием из стеклопластика или стеклоткани. В процессе эксплуатации волокнистая изоляция трубопроводов подвержена разрушению и потере теплозащитных свойств, что приводит к значительным потерям теплоты при ее транспортировке.

В связи с этим разработка новых и модернизация существующих конструкций теплоизоляции для снижения потерь тепловой энергии при ее передаче, а также, повышение надежности существующей волокнистой тепловой изоляции трубопроводов СТС является актуальной задачей.

Одним из способов повышения надежности существующей изоляции является нанесение на покровный слой дополнительного тонкопленочного покрытия (ТПП). В качестве ТПП рассмотрен материал, изготовленный на основе каучука синтетического этиленпропилендиенового (СКЭПД), представленный в [5]. Однако данных о физико-технических и тепловых характеристиках ТПП в общей структуре изоляции в литературе отсутствует. Так же,

нет данных об изменении состояния в процессе эксплуатации основного и покровного слоев тепловой изоляции, и влияния ТПП после нанесения на общую картину тепловых процессов, протекающих в толще теплоизоляционной конструкции в зависимости от исходного состояния основного и покровного слоев. В связи с этим, исследование тепловых характеристик теплоизоляционной конструкции с ТПП и теплообменных процессов, протекающих в такой многослойной изоляции, является актуальной задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Исследованиями в области функционирования энерготехнологических комплексов, как объектов распределенной энергетики, занимались В.М. Батенин, В.М. Масленников, Ю.Г. Назмеев, А.Я. Шелгинский и др.

За рубежом вопросам конвективного тепло- и массопереноса в пористых средах посвящено большое количество монографических работ и статей. Среди них стоит отметить научные исследования D.A. Nield, A. Bejan, P. Vasseur, K. Khanafer, A. Al-Amiri, I. Pop, J.-P. Caltagirone, Y.-F. Rao, Y. Miki, K. Fukuda, Y. Takata, M. Kumari, M. C. Charrier-Mojtabi, S.A. Khashan, G. Nath и др.

Изучением вопросов конвективного теплообмена в пористых средах различной конфигурации занимались исследователи А. Жукаускас, В.А. Брайловская, Р.А. Садыков, Т.А. Трифонова, М.А. Шеремет, Сираев Р.Р. и т.д.

Вопросами анализа состояния проблемы повышения эффективности эксплуатирующихся трубопроводов СТС и потерями через теплоизоляционные конструкции трубопроводов при передаче тепловой энергии занимались исследователи И.А. Башмаков, В.В. Гурьев, В.В. Бухмиров, Ю.В. Ваньков, В.С. Слепченко, В.Г. Хромченков, Г.В. Кузнецов, В.Ю. Половников, Б.М. Шойхет, Л.В. Ставрицкая, Г.Х. Умеркин, С.А. Байбаков и др.

Исследования о целесообразности применения ТПП в качестве тепловой изоляции проводились в работах В.А. Рыженкова, В.Т. Шириняна, Р.А.

Ильина, В.В. Бухмирова, Т.А. Низиной, А.Е. Инина, А.Н. Кудряшова, А.И. Щелокова и др.

Большой вклад в развитие теоретических и практических аспектов энергосбережения внесли Е.Я. Соколов, Я.М. Щелоков, Н.И. Данилов, Г.А. Романов и др.

В качестве ТПП рассмотрен материал, изготовленный на основе каучука синтетического этиленпропилендиенового (СКЭПТ), представленный в работах О.Р. Ключникова.

**Объект исследования** – энерготехнологические комплексы, входящие в их состав СТС и теплоизоляционная конструкция трубопроводов СТС с нанесенным на его поверхность ТПП.

**Предмет исследования** – способ повышения эффективности ЭТК за счет усовершенствования технологической схемы и снижения потерь тепловой энергии через изолированную поверхность трубопроводов при транспортировке теплоносителя в СТС.

**Целью диссертационной работы** в постановке, структурировании и решении комплексных задач повышения эффективности работы ЭТК и входящих в их состав СТС, оценка эффективности применения ТПП в общей конструкции существующей традиционной тепловой изоляции трубопроводов с целью снижения потерь тепловой энергии при ее передаче и повышения надежности и экономичности трубопроводов СТС, в проведении теоретических и экспериментальных исследований характеристик теплоизоляционной конструкции с ТПП, исследовании тепловых процессов, протекающих в конструкции тепловой изоляции с ТПП трубопроводов тепловых сетей.

**Задачи исследования:**

1. Анализ проблем, ведущих к снижению эффективности ЭТК и надежности входящих в их состав СТС.
2. Экспериментальная оценка теплофизических характеристик теплоизоляционной конструкции с ТПП.

3. Экспериментальное исследование процессов, протекающих в теплоизоляционной конструкции СТС с применением ТПП.
4. Математическое моделирование тепловых процессов в тепловой изоляции СТС с ТПП в условиях естественной и вынужденной конвекции.
5. Оценка эффективности и технико-экономическая оценка применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов СТС поселка Осиново Зеленодольского района Республики Татарстан входящих в состав ЭТК «Майский».
6. Разработка практических рекомендаций по модернизации технологической схемы, способствующих повышению эффективности ЭТК «Майский».

**Соответствие паспорту специальности.** По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертационная работа соответствует паспорту специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы, в части пункта 3 – использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов, пункта 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, пункта 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.

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

- Впервые определены теплофизические характеристики ТПП в общей конструкции традиционной тепловой изоляции трубопроводов СТС с основным слоем из минеральной ваты и покровным слоем из стеклопластика.
- Экспериментально определены плотности тепловых потоков, проходящих через конструкцию тепловой изоляции до и после нанесения ТПП, ха-

рактизирующие тепловые потери, выявленные в результате экспериментального исследования, основанного на методе неограниченного цилиндрического слоя.

- Впервые проведено математическое моделирование тепловых процессов, протекающих в конструкции тепловой изоляции трубопроводов СТС с применением ТПП.
- На основании математической модели проанализировано состояние основного изоляционного и покровного слоев, состоящих из минеральной ваты и стеклопластика и их общее влияние на энергосберегающие характеристики.
- Разработан метод энергосбережения при передаче тепловой энергии за счет снижения потерь тепла через тепловую изоляцию трубопроводов СТС с применением ТПП на поверхности существующей традиционной изоляции.
- Представлен совокупный системных эффект от внедрения мероприятий по модернизации, способствующих повышению эффективности работы ЭТК.

**Теоретическая значимость работы:** заключается в том, что полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований в дальнейшем могут быть использованы для моделирования теплообменных процессов, протекающих в толще многослойной теплоизоляционной конструкции сложной конфигурации в зависимости от состояния основного и покровного слоев, а также от способа размещения трубопроводов.

**Практическая значимость работы** – результаты диссертационной работы целесообразно использовать на этапе проектирования для прогнозирования динамики ухудшения свойств тепловой изоляции, на этапе эксплуатации для оценки состояния теплоизоляционных конструкций, повышения надежности и своевременного восстановления теплозащитных свойств. Предложенный способ энергосбережения при транспортировке тепловой энергии в СТС, а также мероприятия по модернизации технологической схемы ЭТК позволят улучшить финансово-экономические показатели объектов распределенной энергетики, повысить их инвестиционную привлекательность при проведении работ по модернизации, реконструкции и техническо-

му перевооружению, что в дальнейшем позволит повысить экономические показатели энергетических систем, как на региональном, так и федеральном уровнях.

**Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов,** полученных экспериментальных данных в работе, подтверждается применением действующих аттестованных методик и государственных стандартов, а также использованием аттестованных средств измерений с высоким классом точности, прошедших периодическую поверку.

**Методология и методы исследования** опираются на основные положения системных исследований в энергетике, общеизвестные законы теплообмена, термодинамики и гидродинамики, физический эксперимент; методы сопоставления экспериментальных и теоретических данных; методы математического моделирования; методы тепловизионной диагностики; методы расчета экономической оценки инвестиций, базирующихся на современной международной и отечественной практике. Экспериментальные исследования проведены согласно теории подобия на основе физической модели конструкции тепловой изоляции трубопровода на основе метода неограниченного цилиндрического слоя. Теоретические исследования проведены на основе уравнений гидродинамики и конвекции в соответствии с законом Дарси, в приближении Буссинеска. Численное моделирование выполнено методом конечных элементов. Для анализа и визуализации полученных данных использовался пакет программ MS Office 2007, FlexPDE и КОМПАС-3D V13.

**Личное участие автора.** Автор принимал участие в постановке цели и задач исследований, разработке модели конвективного теплообмена, математической модели, разработке экспериментального стенда, методик исследований. Автором проведено численное и экспериментальное исследование процессов, анализ, обработка и обобщение полученных результатов, разработка способа повышения эффективности объекта распределенной энергетики ЭТК, а также надежности существующей тепловой изоляции трубопроводов СТС в составе ЭТК с применением ТПП.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- Результаты экспериментальных исследований тепловых процессов в теплоизоляционной конструкции с применением ТПП.
- Результаты математического моделирования и численного решения тепловых процессов в тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей с нанесенным ТПП.
- Результаты оценки эффективности применения ТПП в общей конструкции традиционной теплоизоляционной конструкции СТС, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика.
- Результаты технико-экономической оценки и рекомендации по повышению теплозащитных свойств существующей тепловой изоляции СТС.
- Совокупный системный эффект от усовершенствования технологической схемы ЭТК «Майский», а также применения ТПП в общей конструкции тепловой изоляции СТС в составе ЭТК «Майский».

**Апробация работы.** Содержание и основные результаты работы докладывались и обсуждались на XVI международном симпозиуме «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение» (г. Казань, 2016 г.); двенадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2017» (г. Иваново, ИГЭУ, 2017 г.); XII международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (г. Казань, КГЭУ, 2017 г.); международной молодежной научной конференции «XXIII Туполевские чтения (школа молодых ученых)» (г. Казань, КНИТУ-КАИ, 2017 г.); III молодежной научно-практической конференции филиала ОАО «ТГК-16» - «Казанская ТЭЦ-3» (г. Казань, Казанская ТЭЦ-3, 2018 г.); международной научно-практической конференции «Водно-энергетический форум-2018» (г. Казань, КГЭУ, 2018 г.); IV Национальной научно-практической конференции «Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве» (г. Казань, КГЭУ, 2018 г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 11 работ, из них 1 программа для ЭВМ, 3 статьи из перечня ВАК, 1 статья в журнале, включенной в базу Scopus и 6 в материалах и тезисах международных, национальных и всероссийских научных конференций.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа изложена на 239 страницах и состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 6 приложений. Работа включает в себя 67 рисунков, 56 таблиц. Список литературы содержит 174 источника.

## **ГЛАВА 1. Анализ состояния проблемы повышения эффективности объектов распределенной энергетики – энерготехнологических комплексов и входящих в их состав систем теплоснабжения**

На сегодняшний день стратегической задачей любого государства является энергетическая безопасность всей энергетической системы, которая включает в себя совокупность всех видов энергетических ресурсов, а также методов и средств их получения, преобразования, распределения, использования, которые обеспечивают потребителей всеми видами энергии. Гарантом безопасности является решение проблем энергосбережения и экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

В последнее время на государственном уровне значительное внимание уделяется вопросам рационального использования энергоресурсов и повышение энергоэффективности [2-4]. С появлением нового Федерального закона №261-ФЗ «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» в ноябре 2009 года, вопросы энергосбережения обрели масштабный характер во всех областях промышленности и жилищно-коммунального сектора. Основными направлениями государственного контроля и регулирования является учет энергоносителей, величина их потребления и условия транспортировки.

Энергетическая система представляет собой большую систему энергетики, имеющая иерархическую структуру, уровнями которой являются страна (государство), район, крупный промышленный, транспортный или сельскохозяйственный узел, отдельное предприятие. Это целостная совокупность станций, электрических и тепловых сетей, объединенных между собой и соединенных общностью графиков в процессе непрерывного производства, передачи и перераспределения электрической и тепловой энергии при общем централизованном управлении таким режимом.

На сегодняшний день для энергетической системы страны характерно непрерывное наращивание мощностей источников производства энергии на

базе традиционных технологий. Однако, дальнейшее развитие энергетики подобным путем, может привести к серьезным трудностям экономического, технического и экологического характера, в том числе необходимо учитывать проблему истощения запасов органического топлива [6].

В связи с этим, стоит отметить, что переход от централизованной энергетики к распределенной энергетике, это основной и долгосрочный вектор развития энергетики в мире. К распределенной энергетике можно отнести объекты малой энергетики (генерации). Примером таких объектов являются нетурбинные мини-электростанции на базе газопоршневых установок, работающих в режиме когенерации.

По оценкам Минэнерго РФ потенциал для малой генерации насчитывает около 100 тыс. небольших изолированных поселений по всей России, в том числе и северных территорий, где обеспечивать централизованное энергоснабжение дорого и нецелесообразно, и малая энергетика может рассматриваться как экономически эффективный источник энергоснабжения. К ним можно отнести энергодефицитные регионы с учетом специфики географического расположения, крупные объекты промышленности, в состав которых входит большое число взаимосвязанных предприятий, а также жилые объекты, в общем, которые можно назвать энерготехнологические комплексы. К тому же, стоит отметить огромный потенциал развития малой генерации на объектах инфраструктуры Северного морского пути, объектов Министерства обороны РФ, Министерства природных ресурсов, Министерства сельского хозяйства и др. Это энергоснабжение метеорологических станций, маяков, военной техники, самолётов, судового оборудования, объектов сотовой связи, рыбацких хозяйств, кемпингов, разработки месторождений нефти и газа, агрохолдингов, тепличных хозяйств и т.д. Отдельного внимания заслуживает также обеспечение потребностей бытового энергопотребления все еще негализированных домашних хозяйств [7].

Наибольшие показатели энергетической и экономической эффективности распределенной энергетики можно получить, решив задачи комплексного

подхода к проблемам энергосбережения, разработав современные или модернизировав существующие энерготехнологические комплексы предприятий.

Энерготехнологический комплекс (ЭТК) предприятия представляет собой взаимосвязанные теплоэнергетические, теплотехнологические и электроэнергетические системы, основой которых является эффективное производство, преобразование, транспорт, аккумулирование, распределение и снабжение энергоносителями технологических систем, систем жизнеобеспечения предприятий, а также для реализации технологически, энергетически и экономически безупречного способа конечного использования энергии на основе осуществления строго регламентированных технологий конкретных материальных производств или услуг при резком снижении энергоемкости технологической продукции или предоставляемых услуг.

Эффективное решение задач создания ЭТК предприятий с высокой энергетической и экономической эффективностью в значительной мере влияет на ускорение развития промышленности, как основы экономического развития страны и значительное сокращение энергопотребления в жилищно-коммунальном секторе. Такие ЭТК обладают следующими положительными качествами:

- высокой экономической эффективностью за счет синергетического эффекта, достигаемого при интегрировании в производство нескольких видов продукции;
- использованием самых современных технологий, вновь разрабатываемых и заимствованных в различных отраслях промышленности;
- кратным снижением экологической нагрузки на регионы размещения установок за счет снижения, а в ряде случаев и исключения, вредных выбросов;
- вовлечением в хозяйственный оборот наряду с традиционными первичными энергоресурсами, например, природного газа, так и вторичными, попутного нефтяного газа, шахтного метана и т.д.;

- возможность создания в необходимых случаях экономически выгодных энергонезависимых средне- и малотоннажных производств [8].

Для достижения желаемого эффекта необходимо решить ряд задач, направленных на снижение потерь энергоресурсов на всех стадиях их использования. Так основными потерями энергоресурсов на промышленных предприятиях и в жилищно-коммунальном секторе являются тепловые потери. Это связано с низкой степенью преобразования тепловой энергии в технологических процессах, несовершенством теплотехнологического оборудования, нерациональными тепловыми схемами теплотехнологических систем, слабым использованием избыточных внутренних энергоресурсов технологий во внешних системах.

Рассмотрим на примере систем теплоснабжения (СТС), ввиду того, что они являются составной частью энергетической системы, а также объектов распределенной энергетики, или так называемых ЭТК, и представляют собой систему, прочно и плотно соединенных между собой участков теплопроводов, по которым теплота с помощью теплоносителя (пара или горячей воды) транспортируется от источников к потребителям.

Одно из основных требований, предъявляемое к СТС, заключается в надежности, т.е. в способности производить, транспортировать и распределять среди потребителей в необходимых количествах теплоноситель с соблюдением заданных параметров при нормальных условиях эксплуатации. Надежность представляется комплексным свойством и может включать отдельно или в сочетании ряд свойств, основными из которых являются:

- безотказность - свойство СТС сохранять работоспособность непрерывно в течение заданного времени или заданной наработки;
- долговечность - свойство оборудования и тепловых сетей сохранять работоспособность до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта;
- ремонтпригодность - свойство объекта, заключающееся в приспособлении к предупреждению и обнаружению причин возникновения его от-

казов, повреждений и устранению их последствий путем проведения технического обслуживания и ремонта;

- режимная управляемость - свойство объекта поддерживать нормальный режим посредством управления;

- живучесть - свойство СТС противостоять возмущениям, не допуская их каскадного развития с массовым нарушением питания потребителей.

Надежность СТС совершенствуют повышением качества элементов, из которых она состоит. Повышение качества реализуется при конструировании, изготовлении и приемке элементов и узлов в эксплуатацию. Когда технические возможности повышения качества элементов в процессе эксплуатации исчерпаны, требуется дальнейшее повышение качества, отвечающее требованиям экономической целесообразности. СТС – сложное техническое сооружение, поэтому ее надежность оценивается показателем качества функционирования. Если все элементы системы исправны, то исправна и она в целом.

В общем случае теплопроводы СТС состоят из трех основных элементов:

- рабочего трубопровода, по которому транспортируется теплоноситель и который в современных условиях обычно выполняется из стальных труб, соединенных между собой с помощью сварки;

- изоляционной конструкции, предназначенной для защиты наружной поверхности стального трубопровода грунта, движущегося наземного транспорта, ветра и т.д.).

В зависимости от используемых материалов изоляционная конструкция теплопровода может выполняться как в виде одного элемента, так и в виде нескольких последовательно соединенных элементов, например, нескольких наложенных друг на друга слоев изоляции, каждый из которых выполняет отдельную задачу (антикоррозионную защиту, тепловую защиту, защиту изоляции от влаги и т.д.).

Одним из условий, обеспечивающим надежное теплоснабжение потребителей, является своевременное выполнение испытания тепловых сетей на тепловые потери и максимальную температуру теплоносителя. В случае обнаружения потерь тепла в СТС, необходимо принять необходимые меры по их устранению и своевременному проведению ремонтно-восстановительных работ. Тепловые потери являются важнейшим технико-экономическим показателем работы СТС. В большинстве случаев тепловые потери в водяных сетях находятся путем тепловых испытаний и затем пересчитываются на фактический температурный режим. Полученные в результате испытаний значения тепловых потерь надо сравнить со средними величинами, характеризующими нормальное состояние теплоизоляционных конструкций.

### **1.1 Классификация энерготехнологических комплексов. Показатели оценки эффективности энерготехнологических комплексов**

Состав современных предприятий включает в себя как производственные, так и вспомогательные, подсобные и обслуживающие подразделения, являющиеся объектами энергопотребления, которые зачастую имеют территориальную разобщенность и расположены на разном удалении от источников энергообеспечения. В связи с этим, развитие ЭТК как объекта распределенной энергетики носит актуальный характер. Развитие распределенной энергетики способствует переходу от централизованного энергообеспечения, к децентрализованному. В свою очередь, энергоснабжение от децентрализованных источников можно обеспечить с помощью различных генерирующих установок различной мощности. В таких установках целесообразно предусмотреть использование местных и возобновляемых источников энергии. Так при сооружении ЭТК, либо модернизации, одним из главных аспектов является задача выбора источника генерации [6-8].

Выбор источника энергоснабжения зависит от основных показателей - это стоимость строительства, себестоимость производства единицы энергии, ожидаемый экономический эффект и срок окупаемости. В дополнении, стоит отметить, что немаловажным показателем является экологическая составля-

ющая влияния ЭТК на окружающую среду. Фактор влияния на окружающую среду, с точки зрения экологии, напрямую зависит от вида используемого топлива. К примеру, при условии работы источника на базе дизельного генератора, строительство станции имеет небольшие капитальные вложения, но при этом показатели выбросов в окружающую среду являются значительными. В случае если источником является солнечная электростанция, выбросов в окружающую среду не наблюдается, за исключением площадей, занимаемых ею, но при этом, стоимость строительства имеет значительную величину. Связано это с тем, что срок окупаемости солнечных фотоэлектрических станций приравнивается к их сроку эксплуатации. Помимо этого, необходимо учитывать влияние всех существующих загрязняющих веществ, образующихся в процессе производства энергии, и реально оценивать их фактор воздействия на окружающую среду. На сегодняшний день, факторов влияния всех этих загрязняющих веществ, практически не исследовано.

Поэтому, при выборе источника энергоснабжения ЭТК, а также при оценке его эффективности, необходимо учитывать экономический и экологический эффект, основанный на глубоком анализе структуры энергообеспечения предприятий, стоимости мощностей и себестоимости производства единицы энергии, а также с учетом удельного выброса загрязняющих веществ в окружающую сферу.

## **1.2 Тепловые потери при транспортировке и распределении тепловой энергии**

Одной из основных проблем энергосбережения в СТС является оптимизация потребления энергоресурсов. Значительную долю потерь тепла в СТС составляет нарушение изоляции трубопроводов. Следствием этого является повышение отпуска тепла от тепловых станций и котельных, и соответственно, увеличение топливопотребления, а также значительные потери тепловой энергии при ее транспортировке [9,10].

Эффективное теплоснабжение крупных городов не может ограничиваться только экономическими преимуществами комбинированной выработ-

ки тепловой и электрической энергией на ТЭЦ. Значительную роль в этом вопросе играет система транспортировки тепловой энергии от источника до потребителя. Преимущества централизованного теплоснабжения могут быть реализованы только при высоком качестве тепловых сетей, т.е. в случае высокой их эксплуатационной надежности, долговечности и достаточно низких потерях тепловой энергии при транспортировке теплоты по трубопроводам СТС [11].

Повышение надежности СТС - актуальная и важная задача для энергетических систем страны. Российская СТС является самой большой в мире и состоит примерно из 50 тыс. локальных систем теплоснабжения, обслуживаемых 17 тыс. предприятий теплоснабжения. Тепло от этих источников передается по тепловым сетям протяженностью 176,5 тыс. км в двухтрубном исчислении (это в 5,5 раза больше, чем в США), с общей площадью поверхности около 180 км<sup>2</sup> для примерно 44 млн. абонентов. Централизованным теплоснабжением для нужд отопления обеспечены 80% жилищного фонда России (91% в городах и 52% в сельской местности), а горячей водой из систем централизованного теплоснабжения 63% населения России (79% в городах и 22% в сельской местности) [12].

В работе [12] отмечено, что по данным российской статистики потери в тепловых сетях оцениваются равными 8,7% от уровня потребления тепловой энергии, что соответствует 100-120 млн. Гкал. Потери на уровне 23% могут быть характерны для суммы потерь в магистральных и распределительных сетях, обслуживающих мелких потребителей. С учетом того, что доля мелких потребителей, получающих тепловую энергию по распределительным сетям, равна приблизительно 50%, потери тепловой энергии в тепловых сетях общего пользования могут быть оценены равными 215-245 млн. Гкал, или около 15% от всей тепловой энергии, произведенной на электростанциях и котельных.

По анализу Северо-Западной зоны Российской Федерации известно, что у 80% трубопроводов превышен срок безопасности работы, тепловые по-

тери доходят до 40% и непроизводительно теряется до 80 млн. т.у.т (более 100 млрд. руб.) [13]. В частности, также, при рассмотрении состояния СТС Республики Татарстан, где протяженность тепловых сетей составляет 3268,4 км, из них нуждающихся в замене 909,4 км [14].

Исследования, представленные в [12], по результатам диагностики более чем трехсот российских СТС, позволили сформулировать основные системные проблемы функционирования российского теплоснабжения следующим образом: заниженный (по сравнению с реальным) уровень потерь, включаемый в тарифы на тепло, что существенно занижает экономическую эффективность расходов на реконструкцию тепловых сетей; высокий уровень фактических потерь; высокий уровень затрат на эксплуатацию (около 50% всех затрат в системах теплоснабжения); избыточная централизация значительной части систем теплоснабжения, что обуславливает повышенные потери; высокая степень износа тепловых сетей и превышение в ряде населенных пунктов критического уровня частоты отказов; неудовлетворительное техническое состояние тепловых сетей, нарушение тепловой изоляции и высокие потери тепловой энергии; нарушение гидравлических режимов и сопутствующие ему «недотопы» и «перетопы» отдельных зданий.

При правильном выполнении проектных работ, гидравлической увязке и качественных строительно-монтажных работ, величина тепловых потерь не должна превышать 5-7% значения.

Для нашей страны характерна разветвленная и протяженная СТС, поэтому значительное влияние на объемы тепловых потерь оказывает качество изоляции тепловых сетей. При оценке фактических потерь тепловой энергии при ее транспортировке в системах теплоснабжения нашей страны эти величины достигают 25% и более. Известно, что потери тепла в магистральных и распределительных сетях значительно отличаются. Эти различия могут быть связаны с техническим состоянием тепловых сетей, так как магистральные сети, как правило, существенно лучше. Помимо этого, на величину потерь влияет суммарная поверхность тепловых сетей. Суммарная поверхность ма-

гистральных сетей намного меньше суммарной поверхности распределительных сетей, поскольку распределительные сети более разветвленные и протяженные. Поэтому доля потерь тепла в распределительных сетях значительно превышает потери в магистральных [15].

Такое состояние СТС определяется применением неэффективной тепловой изоляцией оборудования систем теплоснабжения или полным ее отсутствием. Некачественная тепловая изоляция является одной из основных причин повреждения трубопроводов и поверхностей теплообмена, которая впоследствии приводит к образованию свищей и потере теплоносителя.

Наиболее часто встречаемые повреждения трубопроводов тепловых сетей, которые могут достигать 80%, происходят из-за коррозионных процессов на наружной поверхности трубопровода, вызванных в основном контактом металлической поверхности трубы с влагой, которая возникает при периодическом или постоянном затоплении каналов грунтовыми или поверхностными водами.

Большое количество работ посвящено изучению проблем потери тепла при ее транспортировке, для разрешения которой необходимо решить ряд задач, таких как – уменьшение издержек за счет повышения надежности и долговечности трубопроводов и снижения тепловых потерь. Решение этих задач, сформулированы в пути их достижения – повышение качества теплоносителя, качества тепловой изоляции и качества стальных труб [16].

Одним из методов снижения потерь тепла в СТС является замена ветхих и наиболее часто повреждаемых участков тепловых сетей с применением эффективных теплоизоляционных конструкций [17].

Кроме того, для снижения тепловых потерь с поверхности трубопроводов необходимо соблюдать требования по контролю качества покрытия тепловой изоляции, контролю степени старения тепловой изоляции на основе периодического контроля тепловых излучений на контролируемых объектах [18].

В результате исследований, проведенных в работе [19], автором показано, что тепловые потери через изоляцию зависят от многих факторов, включая протяженность трубопроводов различных диаметров, применяемые теплоизоляционные конструкции, принятые температурные режимы, состояние СТС и сроки их эксплуатации, поэтому тепловые потери являются индивидуальной характеристикой каждой тепловой сети. Так же, тепловые потери являются важным тарифообразующим фактором и одним из показателей энергетической эффективности эксплуатации тепловых сетей, поэтому определение и снижение этих потерь является важной практической задачей.

Определение потерь тепла при транспорте теплоносителя является важной задачей, результаты решения которой оказывают серьезное влияние в процессе формирования тарифа на тепловую энергию. Поэтому знание этой величины позволяет также правильно выбирать мощности основного и вспомогательного оборудования центральных тепловых пунктов и, в конечном счете, источника теплоснабжения. Величина тепловых потерь при транспорте теплоносителя является решающим фактором при выборе структуры системы теплоснабжения с возможной ее децентрализацией, выборе температурного графика тепловых сетей и др. Определение реальных тепловых потерь и сравнение их с нормативными значениями позволяет обосновать эффективность проведения работ по модернизации СТС с заменой трубопроводов и их тепловой изоляции [20].

Расширение номенклатуры применяемых теплоизоляционных материалов и увеличение количества проектных, строительных и монтажных организаций, выполняющих теплоизоляционные работы, требуют организации контроля эффективности принимаемых технических решений и качества выполняемых работ. Представляется необходимой организация натуральных наблюдений, сбор, анализ и обобщение информации об эксплуатационных свойствах новых теплоизоляционных материалов, используемых в конструкциях промышленной тепловой изоляции.

На данный момент, минераловатные теплоизоляционные изделия с покровным слоем, выполняющим функции защитного покрытия, из стеклопластика или стеклоткани, являются наиболее распространенными как в магистральных, так и в распределительных сетях, и применяются в качестве тепловой изоляции трубопроводов при надземной прокладке, в технических подпольях и подвалах, а также в тепловых камерах после реконструкции и капитального ремонта. В связи с этим разработка новых и модернизация существующих конструкций теплоизоляции является актуальной задачей.

### **1.3 Анализ существующих видов теплоизоляционных материалов, применяемых в системах теплоснабжения**

Тепловая изоляция широко применяется в энергетике для изоляции сооружений, оборудования и трубопроводов, в частности котлов, паровых и газовых турбин, дымовых труб, резервуаров для хранения жидкого топлива, тепловых сетей и т.д. Основными критериями промышленной тепловой изоляции является широкий температурный диапазон изолируемых поверхностей от  $-180^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$  и высокий уровень теплового потока, проходящий через тепловую изоляцию [21].

В СТС теплоизоляционные конструкции предназначены для поддержания заданной температуры теплоносителя в трубопроводах, снижения потерь тепловой энергии при ее транспортировке и поддержания требуемой температуры на внешней поверхности тепловой изоляции, в соответствии с требованиями [22].

При производстве теплоизоляционных материалов и конструкций применяются специальные материалы, отличительной особенностью которых являются низкие значения теплопроводности, которые должны соответствовать интервалу температур при соответствующих условиях работы. Чем ниже значения теплопроводности, тем меньше потери тепловой энергии при ее транспортировке и соответственно, выполняется условие поддержания заданной температуры теплоносителя.

Теплоизоляционные материалы подразделяются на три группы в зависимости от теплопроводности:

- низкой теплопроводности – не более  $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при средней температуре материала в конструкции  $25\text{°C}$  и не более  $0,08 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при  $125\text{°C}$ ;
- средней теплопроводности  $0,06\text{-}0,115 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при средней температуре материала в конструкции  $25\text{°C}$  и  $0,08\text{-}0,14 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при  $125\text{°C}$ ;
- повышенной теплопроводности  $0,115\text{-}0,175 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при средней температуре материала в конструкции  $25\text{°C}$  и  $0,14\text{-}0,21 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  при  $125\text{°C}$ .

Следует отметить, что из таких теплоизоляционных материалов выполняется только основной слой теплоизоляционной конструкции.

Теплоизоляционная конструкция в зависимости от области применения состоит из нескольких элементов. На изолируемых поверхностях с положительными температурами она состоит из теплоизоляционного и защитно-покровного слоев, а также крепежных элементов, на поверхностях с отрицательной температурой дополнительно к перечисленным применяется пароизоляционный слой [21].

Исходя из конструкции тепловой изоляции, теплоизоляционный слой предназначен для снижения величины теплового потока и изолируемой поверхности, защитно-покровный слой предназначен для сохранности теплоизоляционного слоя в условиях эксплуатации от воздействия внешних факторов, таких как ветровых нагрузок, атмосферных осадков и других воздействий. Для исключения увлажнения теплоизоляционного слоя за счет конденсации влаги из воздуха применяется пароизоляционный слой. Назначение крепежных элементов обусловлено обеспечением надежной фиксации теплоизоляционной конструкции на изолируемой поверхности с помощью бандажей, штырей, стяжек и т.д. [21].

Основная часть промышленной тепловой изоляции 85-90% составляет волокнистые материалы на основе минеральной ваты и стекловолокна. В процентном соотношении из этого диапазона свыше 55% изоляции применяется на объектах с изолируемой поверхностью, температура которых состав-

ляет до 200°C, около 25% в температурной области 180-400°C, 5% в диапазоне 400-600°C, 0,1% от общей массы тепловой изоляции составляет неорганические формованные изделия, применяемые на поверхностях температура которых превышает 600°C и 15% промышленной изоляции применяется для изолирования поверхностей с отрицательной температурой от -14°C до -180°C [21].

### **1.3.1 Классификация теплоизоляционных материалов**

Современные теплоизоляционные материалы, применяемые в теплоизоляционных конструкциях СТС, в независимости от искусственного или естественного происхождения, могут быть классифицированы исходя из характеристики сырья, используемого для изготовления таких материалов: волокнистые неорганические, к которым относятся – асбест, минеральная вата, стекловата, стекловолокно; волокнистые органические – войлок, древесина, лен, хлопок, торф, камыш, солома; пористые неорганические – вспученные перлит, вермикулит, диатомит, трепел, газобетон, пенобетон; пористые органические – пробка, пенополистирол, пенополиуретан, вспененные каучуки; пористые комбинированные – пенополимербетон; композитные неорганические – тонкопленочные теплоизоляционные покрытия на основе силикона; композитные комбинированные - тонкопленочные теплоизоляционные покрытия на основе каучуков [23-25].

Ограничением в использовании органического сырья для производства теплоизоляционных материалов является его малая температуроустойчивость, которая как правило, не превышает 100°C. Помимо этого, органические теплоизоляционные материалы легко загораются, подвержены гниению, плесневению, поражению насекомыми и грызунами [26].

Для изготовления неорганических теплоизоляционных материалов в качестве сырья могут использоваться минералы, обладающие высокой термостойкостью в сочетании с волокнистой (различные виды асбеста), волокнисто-чешуйчатой (слюда, с ее разновидностями, например, вермикулит) и микропористой (диатомит, трепел) структурой. Из перечисленных видов

сырья при термической обработке – обжиге, иногда сопровождаемом вспучиванием, и распушке или дроблении получают сыпучие или волокнистые материалы, которые применяются в виде засыпок или для производства изделий.

Также, для производства высококачественных теплоизоляционных материалов используется неорганическое сырье, получаемое из расплава различных изверженных горных пород, таких как граниты, базальты, диабазы, пемза и т.д., стеклянной шихты и металлургических шлаков.

Материалы, полученные таким образом, в зависимости от исходного сырья называются минеральной, в частности базальтовой, а также стеклянной ватой. Отличительной чертой таких видов материалов является их большая сжимаемость, даже при малых нагрузках, которая приводит к увеличению их плотности, и соответственно, теплопроводности. Поэтому при производстве штучных теплоизоляционных изделий различной конфигурации на основе минеральной и стеклянной ваты используют связующие добавки [26].

Применяются теплоизоляционные материалы и изделия на основе синтетических полимеров, таких как полистирол, поливинилхлорид, полиуретан, с искусственно созданной пористостью, которая достигается за счет введения в жидкую массу порообразующих веществ. Такие теплоизоляционные материалы называют пено- или поропластами и выдерживают температуру 120-150°C. Для их изготовления в качестве теплоизоляционного материала применяют фенолформальдегидные смолы.

Производимые промышленностью теплоизоляционные изделия, различаются как по материалам, так и по форме изделий и их механическим свойствам. Различают жесткие, полужесткие и мягкие изделия, характеризующиеся их сжимаемостью под действием стандартной удельной нагрузки на поверхность изделий, равной 2 кПа. При сжимаемости менее 6%, при такой нагрузке, изделия относятся к жестким, свыше 30% - к мягким, при промежуточных значениях сжимаемости от 6% до 30% изделия называются полужесткими.

Теплоизоляционные изделия изготавливаются также на основе минеральной ваты с добавлением связующих веществ. При таком способе изготовления в зависимости от вида и содержания этих веществ, а также от исходной плотности минеральной ваты, помимо жестких получают полужесткие и мягкие теплоизоляционные изделия.

Важно отметить, что применение теплоизоляционных конструкций для изоляции трубопроводов в системах теплоснабжения, а также их эффективность в первую очередь определяется их физико-механическими свойствами, основными из которых являются: плотность; коэффициент теплопроводности  $\lambda$ ; влагопоглощение; средний предел прочности при сжатии, изгибе и растяжении; максимальная температура применения, а также воздухопроницаемость [27].

Определяющей величиной, при оценке эффективности применения того или иного теплоизоляционного материала, выступает коэффициента теплопроводности, который должен иметь наименьшее значение.

На сегодняшний день, ввиду огромного предложения на рынке современных теплоизоляционных материалов, провести анализ всего перечня материалов достаточно сложно, поэтому в таблице 1 (Приложение 1) приведены наиболее известные теплоизоляционные материалы с характерными основными физико-механическими свойствами [28-42].

Нельзя не отметить, что в последние десятилетия список теплоизоляционных материалов пополнили жидкокерамические теплоизоляционные покрытия (ЖКП) различных производителей, в состав которых входит вакуумированные стеклянные микросферы, оксиды металлов (кремния, титана, кальция и цинка) [42], тонкодисперсные минеральные наполнители (диатомит, белая сажа) [43], собранные в одном материале, такие как теплоизоляционные, гидроизоляционные, антикоррозионные и шумоизоляционные.

Исследования [44,45], проведенные специалистами по изучению физико-механических свойств и теплофизических характеристик, а также технологии процесса теплоизоляции трубопроводов, показали нецелесообразность

применения ЖКП в качестве основной и единственной теплоизоляции трубопроводов для тепловых сетей. Согласно результатам данных исследований, было выявлено, что теплопроводность составила  $0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ , термостойкость до  $100 \text{ °C}$ . С точки зрения практической применимости отмечено, что жидкотехнологичность материала требует многослойности и сушки каждого слоя. После проведения технико-экономического сравнения ЖКП с пенополиуретановой изоляцией, отмечено нецелесообразность применения ЖКП для трубопроводов тепловых сетей надземной прокладки ввиду низкой механической прочности и износостойкости, несоответствие горючести требованиям пожарной безопасности, высокой стоимости по сравнению с пенополиуретановой изоляцией (в 5 и более раз), нетехнологичностью процесса нанесения тепловой изоляции. Термогравиметрический анализ показал, что уже с температуры  $85\text{°C}$  начинается уменьшение массы тепловой изоляции и выделение «ядовитых газов» [45].

Другие исследователи [46], в рамках сравнительной оценки теплоизоляционных свойств ЖКП, также придерживаются мнения о недопустимости их использования в качестве тепловой изоляции технологических трубопроводов и оборудования, ввиду не соответствия требованиям нормативно-технической документации.

В работах [47,48] в результате натурных испытаний и тепловых расчетах удельных тепловых потерь тепловых сетей представлены несоответствия, заявленных фирмой-изготовителем характеристик ЖКП, с действительностью. Исследования показали, что данный вид покрытий нельзя использовать в качестве тепловой изоляции.

Другие исследователи считают, что теплопроводность ЖКП колеблется от  $0,005$  до  $0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ . При повышении давления воздуха в вакуумированных частицах более  $1 \text{ мм рт. ст.}$  теплопроводность материала возрастает и при потере вакуума становится равной  $0,045 \text{ Вт/м}\cdot\text{°C}$ . В процессе эксплуатации теплопроводность материала возрастает в связи с неизбежной потерей

вакуума в частицах за счет фильтрации воздуха в них из окружающей среды [49].

По данным авторов [50], обнаружено, что сопротивление теплопередаче ЖКП гораздо ниже, чем у пенополиэтилена, что также свидетельствует об их низкой эффективности.

Однако следует отметить, что в работах [51-54] опыт применения тонкопленочных теплоизоляционных покрытий для улучшения эффективности изоляции трубопроводов, отличающихся простотой нанесения на теплоизолирующую поверхность, свидетельствует о перспективности их дальнейшего использования в теплоизоляционных конструкциях трубопроводов систем теплоснабжения.

Мнения о том, что допустимо применение тонкопленочных покрытий в целях энергосбережения, также придерживаются авторы исследований, представленных в работах [55,56]. Отмечено, что применение энергосберегающих красок целесообразно в качестве тепловой изоляции трубопроводов в тепловых пунктах, при этом это покрытие одновременно выполняет функцию гидроизоляции, а также для утепления фасадов зданий, но эффективность наблюдается лишь при совместном использовании с другими видами классической тепловой изоляции, поскольку энергосберегающие краски обладают свойствами красок – защищают поверхность от воздействия окружающей среды – и свойствами тепловой изоляции – снижают тепловые потери за счет пористой структуры. Они обладают рядом достоинств: невысокая стоимость производства краски; хорошей адгезией к любым материалам, кроме полиэтилена; механической прочностью; антигрибковыми и противогрибковыми свойствами; влаго- и паронепроницаемостью; устойчивостью к ультрафиолетовому излучению; хорошей коррелируемостью пигментации; низкой стоимостью покрасочных работ; экологической и пожарной безопасностью; низким весом, и как следствие, отсутствием дополнительных нагрузок на ограждающие и опорные конструкции; высоким эстетическим обликом окрашен-

ных поверхностей. Недостатком же являются относительно низкие показатели тепловой защиты.

На возможности применения ГПП в качестве тепловой изоляции указано в литературе [57]. Установлено, что данная возможность допустима, лишь в комбинированной тепловой изоляции, состоящей из газонаполненного полиэтилена высокой плотности, минеральной ваты и тонкопленочного (термостойкого) покрытия.

Аналогичные данные о применении ГПП показаны в [58], но также указано, что они не являются заменой тепловой изоляции, а используются в качестве дополнительного элемента в теплоизоляционных конструкциях, например, для повышения теплоотражающих характеристик.

#### **1.4 Требования, предъявляемые при выборе теплоизоляционных конструкций трубопроводов систем теплоснабжения согласно нормативной документации**

Согласно требований СНиП 41-03-2003 [59] материалы тепловой изоляции и покровного слоя трубопроводов СТС необходимо производить по экономической целесообразности суммарных затрат и капиталовложений.

Также при выборе теплоизоляционных материалов и конструкций для трубопроводов СТС следует учитывать месторасположение теплоизолируемого объекта, температура изолируемой поверхности, температуру окружающей среды, теплотехнические характеристики материалов, допустимую температуру применения теплоизоляционного материала, агрессивные факторы окружающей среды, коррозионные воздействия на материалы, допустимые нагрузки на изолируемую поверхность, условия монтажа и процесс эксплуатации, при которых теплоизоляционные конструкции подвергаются температурным, влажностным, механическим воздействиям, которые определяют перечень предъявляемых к ним требований. Срок службы теплоизоляционных материалов и теплоизоляционной конструкции в большей степени определяется качеством защитного покрытия – покровного слоя [59].

К тому же необходимо учитывать совместимость элементов теплоизоляционной конструкции и защитных покрытий между собой и материалом изолируемого объекта, с агрессивными факторами окружающей среды и возможное воздействие веществ, находящихся в изолируемом объекте [59].

Подбор тепловой изоляции осуществляется в соответствии с инженерными расчетами. Методы инженерных расчетов должны учитывать теплофизические свойства материалов, термическое сопротивление изолированной стенки, температуру теплоносителя и окружающей среды, условия теплообмена на внутренней и внешней поверхностях изоляции [59]. Рекомендовано пользоваться сводом правил СП 41-103-2000 «Проектирование тепловой изоляции» [60], расчеты осуществляются:

- по нормированной плотности теплового потока, регламентируемой СНиП 41-03-2003 [59], для оборудования и трубопроводов надземной прокладки, расположенных на открытом воздухе и в помещении;
- по заданной плотности теплового потока, обусловленной технологическими факторами;
- с целью предотвращения конденсации влаги на наружной поверхности изолируемого объекта;
- с целью предотвращения конденсации влаги и коррозии на внутренних поверхностях объектов, транспортирующих агрессивные газы, содержащие водяные пары;
- для обеспечения заданной температуры на поверхности изолированного объекта по условиям обеспечения безопасности персонала;
- по заданному снижению (повышению) температуры вещества, транспортируемого по трубопроводу;
- по заданной скорости охлаждения или нагревания веществ в емкостях;
- по заданному количеству конденсата в паропроводах;
- для предотвращения замерзания жидкости в трубопроводах при ее остановке;

- по нормированной плотности теплового потока для трубопроводов тепловых сетей подземной канальной и бесканальной прокладки [61].

В результате анализа имеющихся методик расчетов выявлено, что в настоящее время нет нормативно-технической документации, в которой приводятся расчеты с учетом толщины теплоизоляционного слоя в зависимости от назначения и состояния тепловой изоляции оборудования и трубопроводов [62-67].

### **1.5 Эксплуатационные свойства теплоизоляционных материалов применяемых в системах теплоснабжения**

Опыт эксплуатации тепловой изоляции из минеральной ваты [68] свидетельствует, что она наиболее часто подвержена разрушению. Трубопроводы СТС, изолированные минеральной ватой, не обеспечивают экономичность при передаче тепловой энергии, вследствие большой частоты повреждений, ведущих к значительным потерям теплоты через поверхность теплоизоляционной конструкции. Несмотря на неудовлетворительные теплозащитные свойства минеральной ваты, подверженность старению и деформациям, она до сих пор широко применяется в качестве изоляции в СТС. Это связано с тем, что большинство тепловых сетей проектировались и прокладывались еще в 60-х годах XX века [69]. На тот момент теплоизоляция из минеральной ваты была наиболее предпочтительным решением. Однако в настоящее время, когда рынок предлагает огромный выбор альтернативной тепловой изоляции [70], обладающей лучшими теплозащитными свойствами и долговечностью, минеральную вату, ввиду ее стоимости, целесообразно применять только для изоляции трубопроводов, расположенных в помещениях, в проходных тоннелях, в технических подпольях, подвалах и при наземной прокладке на высоких опорах, т.е. в местах, исключаящих увлажнение минеральной ваты и случайные механические повреждения.

В многочисленных работах рассматривалось влияние различных факторов в процессе эксплуатации трубопроводов на увеличение тепловых потерь. Так большое количество работ посвящено изучению влияния увлажне-

ния изоляции, а вопросам деформации, полного или частичного разрушения изоляции уделено недостаточно внимания [71-72].

О роли влияния разрушений тепловой изоляции в процессе эксплуатации на повышение потерь тепла через теплоизоляционную конструкцию указано в работе [73]. Отмечено, что нарушение целостности изоляционного слоя может быть вызвано различными факторами, такими как возникновение тепловых напряжений в теплоизоляционной конструкции за счет частых перепадов температур, повреждений изоляционного материала при разгрузке, укладке и монтаже при строительстве, реконструкции или ремонте трубопроводов тепловых сетей. При проведении ремонтных работ, а также при ликвидации аварий повреждения тепловой изоляции, ведущие к дальнейшему разрушению, происходят из-за сложности точного определения дефектных мест и как следствие, к вскрытию больших участков тепловых сетей. При надземной прокладке, а также при прокладке в технических подпольях и подвалах, также возможны возникновения повреждений изоляции в результате воздействия спецтехники, вандалов и т.д. Анализ и оценка текущего состояния трубопроводов показали, что наличие неизолированных участков и участков с нарушением целостности изоляции составляют до 10% их длины.

В работе [74] представлены исследования с целью оценки масштабов тепловых потерь подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции, позволившие определить, что небольшое изменение геометрических характеристик теплоизоляционной конструкции приводит к увеличению тепловых потерь на 7,5-9,0%. Так суммарные потери тепла, связанные с деформацией тепловой изоляции, могут достигать существенных значений.

Данные о техническом состоянии теплоизоляционных материалов трубопроводов, за счет повышения усадки минеральной ваты и, как следствие, ведущие к потере теплозащитных свойств, представлены в литературе [75].

В работах [76-77] отмечено, что действие эксплуатационных факторов приводит к разрыхлению материала, снижению его прочности. Таким обра-

зом, деформация минеральной ваты влечет за собой резкое снижение ее теплофизических свойств, и как следствие, повышение теплопотерь.

Процессы деформации теплоизоляционной конструкции возникают в результате обвисания под действием собственного веса, а также в результате воздействия внешних факторов при эксплуатации трубопроводов, таких как воздействие ветра, вибрации трубопроводов, механического воздействия при тепловых удлинениях трубопроводов, внешних механических воздействий различного характера. По результатам испытаний, описанных в работе [78], при проведении геометрических обмеров наземных трубопроводов выявлено значительное «провисание» теплоизоляционных конструкций на горизонтальных участках трубопроводов и, как следствие уплотнение и уменьшение толщины теплоизоляционного слоя в верхней части конструкции и образование воздушной прослойки между трубой и теплоизоляционным слоем в ее нижней части, что существенно снижает теплозащитные свойства конструкции. Измерения, проведенные на нескольких участках по длине трубопроводов [78], позволили установить, что толщина теплоизоляционного слоя в обследуемых конструкциях изменяется по периметру и имеет значения в пределах от 30-50 мм в верхней точке и до 200-250 мм в нижней точке. Очевидно, что вследствие уплотнения и уменьшения толщины теплоизоляционного слоя, а также увеличения конвективной составляющей переноса тепла в конструкции снижается ее приведенное термическое сопротивление и существенно возрастают теплопотери теплопровода.

В процессе эксплуатации за счет переменных тепловых воздействий, механических нагрузок, обусловленных вибрацией оборудования и ветровым напором переменного направления, а также из-за увлажнения и высыхания при периодическом отключении оборудования, теплоизоляционный волокнистый слой уплотняется, толщина изоляции уменьшается, теплопроводность ее увеличивается. Теплоизоляционная конструкция изменяет свою форму – «провисает», внутри нее образуются воздушные полости с усиленной конвекцией воздуха, что приводит к уменьшению общего термического

сопротивления теплоизоляционного слоя. Нарушается герметичность покровного слоя и, вследствие этого, возникает циркуляция между внутренней полостью теплоизоляционной конструкции и окружающей средой, тем самым увеличиваются тепловые потери [21].

По результатам экспериментальных исследований по определению плотности тепловых потоков, проходящих через теплоизоляционную конструкцию с основным изоляционным слоем из минеральной ваты, проведенных и представленных в работе [79-80], следует, что максимальное значение тепловых потерь наблюдается по верхней образующей, а минимальное значение по нижней образующей изоляции тепловой сети. Так этот факт свидетельствует о значительном провисании минераловатной тепловой изоляции под кожухом трубопровода.

Данные об ухудшении теплоизоляционных свойств в теплоизоляционной конструкции трубопроводов тепловых сетей приведены в работе [81]. По мнению авторов, в зависимости от технического состояния теплоизоляционной конструкции, отношение фактических тепловых потерь к нормативным составляют в зависимости от вида разрушений, таких как: незначительное разрушение покровного и основного слоев изоляционной конструкции – 1,3-1,5; уплотнение изоляции сверху трубопровода и обвисание снизу – 1,6-1,8; частичное разрушение теплоизоляционной конструкции, уплотнение основного слоя изоляции на 30-50% - 1,7-2,1; уплотнение основного слоя изоляции на 75% - 3,5.

В работе [82] показано, что с увеличением плотности минеральной ваты наблюдается незначительный рост коэффициента теплопроводности материала. Данный факт свидетельствует о том, что с течением времени в процессе эксплуатации теплопроводность минеральной ваты остается практически неизменной.

О влиянии нарушения целостности тепловой изоляции, в частности при частичном отсутствии теплоизоляционного слоя на поверхности трубы, наличие трещин, дефектов изоляционной конструкции, вызванных некаче-

ственным монтажом или физическим старением тепловой изоляции, на рост тепловых потерь теплопроводов отмечено в исследованиях [83].

Дальнейшее изучение проблемы снижения эффективности минеральной ваты в качестве тепловой изоляции в процессе старения проводилось в направлении оценки определения проницаемости и позволило сделать вывод, что отсутствуют объективные данные о сравнительной проницаемости различных видов волокнистых теплоизоляционных материалов. Однако, стоит отметить работу [84], в которой проводились экспериментальные исследования проницаемости различных видов теплоизоляционных материалов. Полученные результаты показали, что проницаемость волокнистых материалов зависит от плотности и структурных характеристик конкретного материала и с уменьшением плотности наблюдается увеличение проницаемости.

При длительной эксплуатации тепловых сетей в результате воздействия внешних факторов, как результата сложных физико-химических процессов, происходит частичное или полное разрушение и деформация тепловой изоляции трубопроводов, существенно изменяя структуру изоляционного материала, увеличивая количество сквозных пор и их размеры, способствуя появлению трещин и других дефектов [85].

Сопоставив имеющиеся данные и проанализировав результаты многочисленных работ, можно сделать вывод, что основной составляющей потерь тепла в конструкции тепловой изоляции трубопроводов, где изоляционным слоем является минеральная вата, является конвективная составляющая.

### **1.6 Способы повышения эффективности применяемых теплоизоляционных конструкций в системах теплоснабжения**

В современной практике приняты следующие способы прокладки трубопроводов СТС: надземная прокладка, где трубопроводы могут быть расположены на открытом воздухе либо в помещениях, включая чердаки и подвалы; подземная прокладка в проходных каналах и тоннелях; подземная прокладка в непроходных каналах; подземная бесканальная прокладка [86].

В не зависимости от способа прокладки структуру тепловых сетей можно представить в виде возрастных групп: ветхие сети ( со сроком службы более 25 лет, т.е. свыше срока их нормальной эксплуатации); старые сети, требующие замены (со сроком службы от 20 до 25 лет); сети нормальной эксплуатации (со сроком службы от 10 до 20 лет); новые сети (со сроком службы до 10 лет) [87,88]. В соответствии со сроками эксплуатации изоляция тепловых сетей имеет износ аналогичный самим трубопроводам [89]. Приведенные показатели требуют активного восстановления изоляции.

Так к примеру, для бесканальной прокладки один из способов повышения эффективности тепловой изоляции является увеличение толщины слоя изоляционного покрытия трубопроводов применительно к трубопроводам с пенополиуретановой изоляцией. Данное решение позволит сократить потери тепловой энергии в 2-3 раза по сравнению с нормативными [90].

Помимо этого, вне зависимости от способа прокладки, необходимо на стадии проектирования предусмотреть толщину теплоизолирующего слоя, обеспечивающую соответствие нормам плотности теплового потока. Должны применяться только современные, качественные и долговечные материалы, благодаря которым сокращаются расходы не только на эксплуатацию, но и на сооружение трубопроводов. В работе [91] предложен метод нанесения теплогидроизоляционного покрытия, когда продолжительность технологического цикла сокращается в 2-2,5 раза, что повышает производительность нанесения покрытий и снижает стоимость выполнения работ.

Авторами в работе [92] установлено, что для развития и модернизации новых энергоэффективных тепловых сетей необходимо совершенствование и улучшение теплоизоляции трубопроводной системы, предпочтительно по новым техническим решениям, на основе композитных полимерных бионических структур.

Также важно своевременное проведение ремонтно-восстановительных работ теплоизоляционных конструкций трубопроводов. Так одним из способов восстановления существующей изоляции, применительно к трубопроводам надземной прокладки (на открытом воздухе и в помещениях) с традиционной тепловой изоляцией, состоящей из минеральной ваты, в качестве основного и покровного слоя в виде стеклопластика, возможно предусмотреть применение дополнительного покрытия в виде ТПП, наносимого на поверхность покровного слоя [93-96]. В качестве наружного покрытия теплоизоляционной конструкции был использован материал, полученный по методике, представленной в [5], изготовленный на основе каучука синтетического этиленпропилендиенового (СКЭПТ), производимого на ПАО «Нижекамскнефтехим». Отличительной особенностью данного ТПП является простота и удобство нанесения на теплоизолируемую поверхность распылителем или кистью. Рассмотренное ТПП является термостойким самовулканизирующимся материалом [93-99], обладающим следующими показателями: максимальная температура применения 300-450°C, средний предел прочности при растяжении 1,76 МПа, водопоглощение за 24 часа 1% по объему, электрическая прочность 19,5 кВ/мм. В настоящее время материалы на основе СКЭПТ используются в энергетике для нужд теплоизоляции технологических трубопроводов [100], в системах кондиционирования и вентиляции, в качестве уплотнений в пластинчатых теплообменниках, наружных защитных оболочек электрокабелей, а также в качестве гидроизоляционных покрытий бетонных и каменных конструкций.

### **1.7 Теоретическое описание и математическое моделирование теплообменных процессов в теплоизоляционных конструкциях с применением тонкопленочных покрытий (ТПП)**

С целью изучения теплообменных процессов в теплоизоляционных конструкциях трубопроводов СТС, имеющих пористую структуру, был проведен анализ литературных источников.

### **1.7.1 Теплообменные процессы в волокнистых теплоизоляционных конструкциях**

В литературе [21] рассмотрены общие закономерности переноса энергии и вещества, тепло- и массоперенос в теплоизоляционных материалах и конструкциях.

Процессы переноса теплоты и вещества в теплоизоляционных конструкциях при их взаимодействии с окружающей средой в процессе эксплуатации являются типичным случаем взаимодействия в термодинамических системах - макроскопических системах, состоящих из большого числа материальных частиц или полей, находящихся в энергетическом взаимодействии, а также обменивающихся друг с другом веществом. Перенос энергии, обусловленный неодинаковой их концентрацией в различных точках систем, может происходить как молекулярным, так и молярным, т.е. конвективным путем.

Передача теплоты в волокнистых теплоизоляционных материалах является сложным процессом, включающим перенос теплоты кондуктивной теплопроводностью, излучением и конвекцией, и осуществляется посредством:

- теплопроводности твердого скелета, образующего пористую структуру материала;
- теплопроводности газа, находящегося в порах и капиллярах;
- излучения между стенками пор и капилляров;
- конвективного переноса теплоты за счет конвективных токов газа в пористой структуре теплоизоляции.

Однако, в целях упрощения тепловых расчетов, для определения теплозащитных свойств теплоизоляционных конструкций используются расчетные зависимости, основанные на законе Фурье, справедливом лишь для твердых гомогенных тел, в которых перенос тепла при наличии градиента температур происходит только за счет кондуктивной теплопроводности. Несомненно, что используемый при таком подходе коэффициент теплопроводности явля-

ется обобщенной характеристикой проводимости теплоты в материале - эффективной теплопроводностью:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda_q + \lambda_p + \lambda_k, \quad (1.1)$$

где  $\lambda_q$  - коэффициент кондуктивной,  $\lambda_p$  - радиационной,  $\lambda_k$  - конвективной теплопроводности.

С учетом выше изложенного, при определении теплопроводности волокнистых материалов, как указано в источнике [21], при расчете теплопроводности теплоизоляционных материалов, применяемых в конструкциях промышленной изоляции, можно использовать формулы для определения кондуктивной теплопроводности материалов в сухом состоянии, имеющие следующий вид:

$$\lambda_q = \frac{1}{\frac{1-a}{\lambda_1} + \frac{a}{\lambda_2}}, \quad (1.2)$$

$$\lambda_1 = (1 - m)\lambda_b + m\lambda_r, \quad (1.3)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\frac{1-m}{\lambda_b} + \frac{m}{\lambda_r}}, \quad (1.4)$$

где  $a$  - экспериментально определяемый коэффициент, характеризующий структуру материала;  $m$  - пористость материала в долях единицы;  $\lambda_b$  - теплопроводность волокна;  $\lambda_r$  - теплопроводность газа, заполняющего пористую структуру материала.

Для расчета радиационной составляющей эффективной теплопроводности волокнистых материалов можно применить следующие формулы:

$$\lambda_p = \frac{\sigma T_m^3}{K_{\text{осл}}} \cdot \frac{\pi d_b}{1-m}, \quad (1.5)$$

где  $\sigma$  - константа Больцмана  $4,965 \cdot 10^{-8}$  ккал/м<sup>2</sup>час·град;  $T_m$  - средняя температура изоляции, К;  $d_b$  - диаметр волокна, м;  $K_{\text{осл}}$  - коэффициент ослабления, константа, определяемая для различных видов волокон по эмпирическим формулам:

$$K_{\text{осл}} = 20md_b T_m + 7 \cdot 10^3 (1 - m)^2 / T_m, \quad (1.6)$$

- для минераловатного волокна;

$$K_{\text{осл}} = 11,2 \cdot 10^6 m d_b T_m + 800 (1 - m)^2 / T_m, \quad (1.7)$$

- для стекловолокна.

Также в источнике [21] представлены критериальные уравнения, полученные на основе расчетных формул для определения конвективной состав-

ляющей, отражающие зависимость относительного коэффициента конвективной теплопроводности

$$E_k = \frac{\lambda_q + \lambda_p + \lambda_k}{\lambda_q + \lambda_p}, \quad (1.8)$$

от фильтрационного числа Релея  $Ra^\otimes$ , которые для цилиндрических теплоизоляционных слоев при  $0 \leq Ra^\otimes \leq 100$  имеют следующий вид

$$E_k = 1 + 5,9 \cdot 10^{-3} [\eta(1 - \eta)]^{3/4} \exp(-4,29\eta)(Ra^\otimes)^2, \quad (1.9)$$

$$Ra^\otimes = \frac{g\beta L K \rho^2 c_p \Delta T}{\mu(\lambda_q + \lambda_p) \cdot 2,78 \cdot 10^{-4}}, \quad (1.10)$$

$$\eta = r_1/r_2, \quad (1.11)$$

$$K = \frac{m^3}{4 \left[ \frac{4(1-m-n/100)}{d_B} \right]^2}, \quad (1.12)$$

где  $2,78 \cdot 10^{-4}$  – коэффициент перевода размерности теплопроводности из ккал/м·час·°С в ккал/м·сек·°С;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости, кг/м·сек;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/сек<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент температурного расширения, 1/°С;  $L$  – толщина слоя изоляции, м;  $r_1$  – радиус поверхности изолируемого трубопровода, м;  $r_2$  – то же, поверхности изоляции, м;  $K$  – коэффициент проницаемости волокнистой изоляции, м<sup>2</sup>;  $n$  – содержание неволокнистых включений, %.

Таким образом, представленные формулы 1.1 - 1.12 позволяют расчетным путем определить эффективную теплопроводность волокнистой изоляции в конструкции в зависимости от вида волокна, его диаметра и теплофизических характеристик, объемной массы волокнистого материала, его пористости и количества неволокнистых включений, температурного режима эксплуатации и геометрических параметров конструкций.

Дальнейшим предметом специального изучения в работе [21] стало изучение процессов молярного переноса вещества в пористых средах, является одной из наиболее сложных проблем. Объясняется это, прежде всего, неопределенностью границ потока в пористой среде. Для решения внешней задачи - обтекания тел потоком - геометрическая характеристика полностью определяется линейным размером тела, для решения внутренней задачи - движения жидкости в трубах и каналах - достаточно знать диаметр и длину трубы. Геометрическая структура пористой среды зависит от размера частиц,

линейных размеров среды и от пористости. Но совокупность этих характеристик еще не определяет однозначно геометрию пористой среды, что объясняется случайным характером распределения в ней пор и капилляров.

Закон сопротивления при движении потока в пористой среде был экспериментально установлен Дарси в 1856 г. Он аналогичен закону Гагена-Пуазейля для внутренней задачи и закону Стокса - для внешней и подтверждает общий принцип гидродинамики, согласно которому при ламинарном режиме движения сопротивление определяется только вязкостными силами и пропорционально первой степени скорости. Отличие заключается в том, что коэффициент пропорциональности в законе Дарси - коэффициент фильтрации не постоянная величина, а параметр, характеризующий свойства пористой среды [21].

При эксплуатации теплоизоляционных конструкций наиболее частыми являются граничные условия третьего рода, характеризующие конвективный теплообмен, когда температуры сред, соприкасаются с внутренней поверхностью изолированного объема и с наружной поверхностью изоляции, а также интенсивностью переноса теплоты от сред к поверхностям.

Конвективный теплообмен осуществляется путем контакта движущейся газообразной или жидкой среды при температуре  $t_{cp}$  с поверхностью твердого тела, имеющий  $t_n$ , отличную от  $t_{cp}$  и определяется законом Ньютона

$$q = \alpha(t_{cp} - t_n), \quad (1.13)$$

Конвективный теплообмен можно описать и без использования (1.13). В теории теплообмена математическая модель такого процесса строится на основе рассмотрения сопряженной задачи, включающей уравнение теплопроводности Фурье для твердого тела, уравнение теплопроводности Фурье-Кирхгофа для движущейся субстанции и уравнение движения Навье-Стокса. В последнее время, в связи с широким использованием численных методов, стала возможной практическая реализация такого подхода. К примеру, для естественной конвекции разработаны алгоритмы и программы расчета, но

все же, преобладающим в технических приложениях является метод расчета, основанный на (1.13).

Коэффициент теплоотдачи при конвективном теплообмене определяется, обычно, экспериментально с использованием теории подобия, результаты выражаются в виде безразмерных зависимостей (критериальных уравнений).

Безразмерный коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, когда движение жидкости или газа вызвано гидростатическими силами, определяется критериями подобия  $Nu$  и  $Re$ .

Для внешней поверхности в расчетах обычно используют суммарные или эффективные коэффициенты теплоотдачи, включающие как конвективный, так и лучистый перенос теплоты. Поскольку температура внешней поверхности изолированных промышленных установок не должна превышать  $40-60^{\circ}\text{C}$ , в обычных условиях вклад радиационного теплообмена в теплоотдачу невелик. Со стороны среды, находящейся на внутренней поверхности за стенкой изолируемого аппарата, коэффициент теплоотдачи, обычно, настолько велик, что его принимают равным бесконечности, полагая температуру на внутренней поверхности изоляции равной температуре среды (сопротивлением переносу теплоты через стенку аппарата или трубопровода за его малостью, обычно, пренебрегают).

Большое количество работ посвящено изучению теплообменных процессов и явлений в пористых средах, имеющих значение при решении как инженерных, так и научных проблем.

Значительный интерес представляет [101], в которой представлен полный обзор теоретических и экспериментальных работ изучения конвективных явлений в пористых средах на основе модели Дарси, при малой скорости фильтрации.

Исследование процессов переноса тепла через пористую стенку и в тепловых пограничных слоях при фильтрации воздуха представлено в монографии Ф.В. Ушкова [102], где отмечено, что фильтрация воздуха через теплоизоляционную конструкцию оказывает влияние на теплопотери и темпера-

туру ее внутренней поверхности. К тому же тепловой поток и смещение температурного поля в каждом сечении пористой стенки теплоизоляционной конструкции при сквозной фильтрации зависят от структуры материала и термических свойств стенки трубопровода, условий теплообмена на ее поверхностях, скорости направления фильтрации и физических свойств газовой смеси при фильтрации.

В работе [103] предложена обобщенная математическая модель процессов стационарного нелинейного процесса переноса тепла через многослойные ограждающие конструкции с учетом фильтрации воздуха. В частности, в работе показано, что влияние фильтрации воздуха через теплоизоляционную конструкцию, имеющую капиллярно-пористую структуру, на потери тепла или плотность тепловых потоков, а также на величину термического сопротивления, представлено в виде математической модели.

В ряде работ были исследованы процессы конвективной фильтрации и теплообмена в средах с внутренним тепловыделением при условиях возникновения конвекции в горизонтальном плоском слое, в частности в работе [104] численно изучалась двумерная конвекция в горизонтальном цилиндрическом слое пористой среды Дарси с границами одинаковой температуры и однородным внутренним тепловыделением.

Другими исследователями были проведены работы по изучению условий возникновения, устойчивости, особенностей теплообмена симметричных и ассиметричных конвективных движений в слое насыщенной пористой среды с однородным внутренним тепловыделением [105]. В работе кратко представлены результаты расчетов в случае адиабатической внутренней поверхности цилиндрического слоя, на внешней границе которой выполняется ньютоновское условие теплоотдачи.



Рис. 1.1. Линии тока (а) и изотермы (б) конвективного движения в цилиндрическом слое с теплоизолированной внутренней поверхностью для радиуса  $R = 0.5$ ,  $cF = 0.55$ ,  $Gr = 10\,000$ ,  $Pr = 1$ ,  $Da = 10-4$ ,  $Bi = 1$

Структуры возникающих конвективных движений представлены на рис. 1.1. Течение жидкости происходит преимущественно в верхней половине слоя, под внутренним цилиндром образуется застойная зона, размер которой зависит от числа  $Bi$ . С ростом  $Bi$  величины максимальной и средней температур в полости уменьшаются.

Стоит отметить работу, в которой приведены численные исследования и проведено математическое моделирование нестационарных режимов естественной конвекции в замкнутой пористой цилиндрической полости с теплопроводной оболочкой конечной толщины в условиях конвективного теплообмена с внешней средой [106].

### 1.7.2 Внешние процессы, влияющие на теплообмен в теплоизоляционных конструкциях

Предметом специального изучения является необходимость учета факторов и процессов, влияющих на условия эксплуатации и взаимодействия трубопроводов тепловых сетей с окружающей средой.

Наиболее показательны численные исследования тепловых режимов с учетом конвективного движения воздуха в полости канала тепловых сетей, которые приводятся в работах [107,108]. Согласно результатов численного моделирования, в этих работах были получены распределение поля температур в зоне прокладки тепловой сети, и скорость движения воздуха в полости канала, которая не превышает 0,05 м/сек. Структура течения воздуха представлена следующим образом (рис. 1.2).

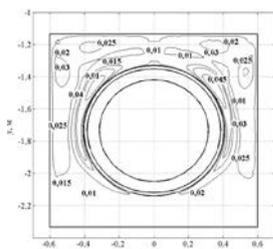


Рис. 1.2. Линии тока воздуха в полости канала трубопровода тепловой сети.

Воздух поднимается со дна канала к трубопроводу и нагревается, достигнув перекрытия канала, воздух охлаждается, соприкасаясь с холодными стенками, и опускается вниз. Таким образом, в полости канала наблюдается два симметричных циркуляционных течения, которые соответствуют процессам естественной конвекции в замкнутом пространстве [109].

Для решения поставленной задачи, необходимо изучить, как влияет реальная практика эксплуатации трубопроводов тепловых сетей в технических подпольях и подвалах на распределение температур на поверхности изоляции трубопровода, и какую роль играет в формировании теплового режима в конструкции тепловой изоляции. Следовательно, для полного описания исследуемых процессов, необходимо решить сопряженные задачи для многосвязных областей.

Описывая процессы, протекающие в пористой теплоизоляционной конструкции, необходимо определить и изучить влияние среднего коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании трубопровода потоком воздуха на распределение давления по поверхности изоляции трубопровода.

Множество литературных источников [110-115] посвящены изучению процессов теплообмена при поперечном обтекании труб. Процесс теплоотдачи цилиндра и характер обтекания цилиндра находятся в тесной взаимосвязи. Характер обтекания цилиндра довольно сложен и зависит от числа  $Re$ , степени турбулентности потока и других факторов. Гидродинамическая картина движения потока воздуха вблизи поверхности изоляционной конструкции трубопровода складывается следующим образом. Наличие сил вязкости в потоке воздуха приводит к образованию на лобовой поверхности трубы ламинарного пограничного слоя, толщина которого постепенно увеличивается. При малых значениях чисел  $Re$  труба, охваченная со всех

сторон потоком, плавно обтекается, и пограничный слой сходит с поверхности только в кормовой части трубы. Ввиду малых скоростей потока воздуха и небольших числах  $Re > 150$ , а также влияния инерционных сил, обтекание трубы сопровождается отрывом ламинарного пограничного слоя от поверхности трубы и образованием сложного вихревого течения за трубой.

При этом характер обтекания и условия обтекания фронтальной и кормовой частей трубы различны. В лобовой точке трубы набегающий поток воздуха разделяется на две части и плавно обтекает переднюю часть трубы. На поверхности трубы образуется пограничный слой, имеющий наименьшую толщину в лобовой точке, который далее постепенно увеличивается в размерах. Изменение пограничного слоя вдоль периметра трубы протекает в условиях переменной скорости потока и переменного давления. Скорость слоев воздуха, примыкающих к внешней границе пограничного слоя, увеличивается вдоль периметра трубы, а давление в соответствии с уравнением Бернулли уменьшается. При достижении точки периметра, отвечающей углу  $\varphi = 90^\circ$ , скорость достигает наибольших значений и далее начинает уменьшаться, что сопровождается соответствующим увеличением давления. В этой области пограничный слой становится неустойчивым и в нем возникает обратное течение, которое оттесняет поток от поверхности. В итоге происходит отрыв от потока и образование вихревой зоны, охватывающей кормовую часть трубы. Положение точки отрыва пограничного слоя зависит от величины числа  $Re$  и степени турбулентности набегающего потока. При малой степени турбулентности потока воздуха и при небольших числах  $Re$ , характеризующих ламинарное течение, местоположением зоны начала отрыва пограничного слоя является угол  $\varphi = 80-85^\circ$ . При значительных числах  $Re = (1-4) \cdot 10^5$ , течение на большей части периметра в пограничном слое становится турбулентным. Турбулентный пограничный слой более устойчив, зона начала отрыва отодвигается в область больших углов  $\varphi = 120-140^\circ$ .

В работе [116] представлен характер обтекания трубы при различных значениях  $Re$  (рис. 1.3). Так при  $Re < 40$  обтекание цилиндра безотрывное, но

с образованием неподвижной застойной зоны, размеры которой увеличиваются с ростом  $Re$ , достигая примерно диаметра при  $Re=40$ . При дальнейшем увеличении  $Re$  застойная зона приходит в движение и образуется циркуляционная зона с парой симметричных вихрей. На контуре цилиндра появляются две симметричные точки отрыва. С увеличением  $Re$  размеры вихрей растут, достигая примерно трех диаметров при  $Re=150$ , при этом точка отрыва смещается вверх по потоку до угла  $\varphi=82^\circ$ . На контуре цилиндра образуются два ламинарных пограничных слоя – один на лобовой стороне, другой на тыльной стороне возвратного течения. Скорость возвратного течения равна примерно 0,1-0,2 скорости набегающего потока, поэтому на тыльной стороне пограничный слой толще [116].

С возрастанием  $Re$ , с учетом того, что вдали от цилиндра в следе возникают колебания (при условии бесконечно свободного пространства), их амплитуда увеличивается, а сами колебания наблюдаются и вблизи цилиндра. Данный режим обтекания характерен для трубопроводов, расположенных как в технических подпольях и подвалах, так и для трубопроводов, расположенных в канале. При  $Re=150$  они начинают раскачивать циркуляционную зону, вследствие чего вихри попеременно выбрасываются во внешний поток. Качания ближнего следа передаются пограничному слою и даже набегающей на лобовую точку струе жидкости.

Волны следа и вихревая дорожка генерируют вдали от цилиндра турбулентные пятна, а с ростом  $Re$  дальний след становится полностью турбулентным. Граница между ламинарной и турбулентной областями следа приближается к цилиндру при увеличении  $Re$  – при  $Re=10^4$  она достигает цилиндра, а при  $Re\sim 10^5$  точки отрыва. Перемешивание в области точки отрыва выравнивает поле скорости в пограничном слое, увеличивает его кинетическую энергию, в результате чего точка отрыва смещается вниз по потоку до угла  $\varphi\approx 102^\circ$ . Это приводит к улучшению обтекания и как следствие к резкому уменьшению суммарного коэффициента сопротивления цилиндра. Приведенный способ обтекания труб характерен для трубопроводов тепловых се-

тей при условии надземной прокладки на отдельно стоящих опорах и эстакадах. Для данного способа прокладки средняя скорость ветра в отопительный период по регионам России составляет от 0,9 до 10,1 м/с. При данных скоростях число  $Re$  значительно возрастает, что влечет за собой образование турбулентного режима обтекания трубопровода воздухом.

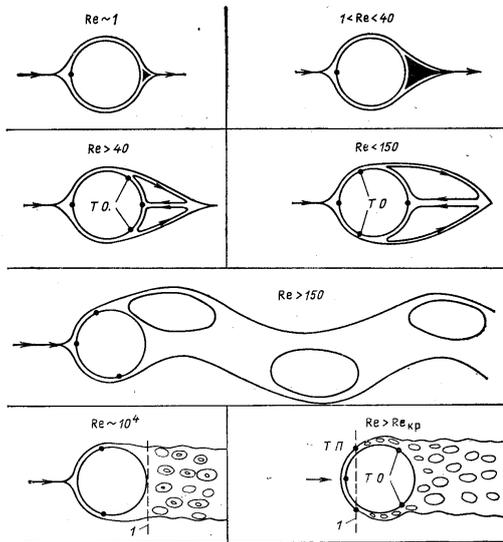


Рис. 1.3. Картина обтекания цилиндра, наблюдаемая при поперечном обтекании при различных  $Re$  (1 – граница турбулентности следа, ТО – точка отрыва).

Такая картина обтекания трубы в значительной мере отражается и на теплоотдаче. Интенсивность теплоотдачи по окружности неодинакова. Представление об ее относительном изменении показано на рис. 1.4 [116].

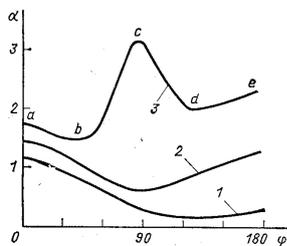


Рис.1.4. Изменение относительного коэффициента теплоотдачи по окружности цилиндра при различных режимах обтекания.

Кривая 1 на рис. 1.4 соответствует безотрывному обтеканию при  $Re < 40$ , кривая 2 соответствует ламинарному обтеканию с отрывом, кривая 3 относится к обтеканию с отрывом в точке  $\varphi = 120^\circ$ , эта кривая интерпретируется следующим образом: на участке  $ab$  – ламинарный пограничный слой,  $bc$  – область перехода;  $cd$  – турбулентный пограничный слой основного течения;  $d$  – точка отрыва; на участке  $ed$  – пограничный слой от возвратного течения, развивается от точки  $e$  к точке  $d$ .

Для определения среднего по периметру трубы коэффициента теплоотдачи воздуха при вынужденном течении используются следующие зависимости [112]:

при  $Re_{дж} < 10^3$

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,49 \cdot Re_{дж}^{0,50}, \quad (1.14)$$

при  $Re_{дж} > 10^3$

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,245 \cdot Re_{дж}^{0,60}, \quad (1.15)$$

При расчете теплоотдачи в условиях свободной конвекции около горизонтальных труб применяется критериальная формула М.А. Михеева, где средний коэффициент теплоотдачи [117] равен

$$\overline{Nu}_m = C \cdot Ra_m^n, \quad (1.16)$$

Коэффициенты  $C$  и  $n$  в зависимости от режима течения приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1. Значения коэффициентов  $C$  и  $n$  в формуле (1.16)

| $Ra_m = Gr_m \cdot Pr_m$         | Режим течения                           | $C$   | $n$ |
|----------------------------------|---|-------|-----|
| $< 10^{-3}$                      | плёночный                               | 0,500 | 0   |
| $10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$      | переходный от плёночного к ламинарному  | 1,180 | 1/8 |
| $5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$ | ламинарный и переходный к турбулентному | 0,540 | 1/4 |
| $> 2 \cdot 10^7$                 | турбулентный                            | 0,135 | 1/3 |

Распределение давления на поверхности изоляции трубопровода тепловой сети является чрезвычайно важной структурной характеристикой потока, позволяющей определить распределение скорости вне пограничного слоя лобовой части трубопровода, рассчитать сопротивление давления, которое в зависимости от  $Re$  является основной составляющей полного сопротивления цилиндра.

С целью оценки характера изменения распределения давления на поверхности цилиндра в условиях ламинарного обтекания следует отметить работу [118], в которой представлен график распределения давления на поверхности цилиндра (рис.1.5).

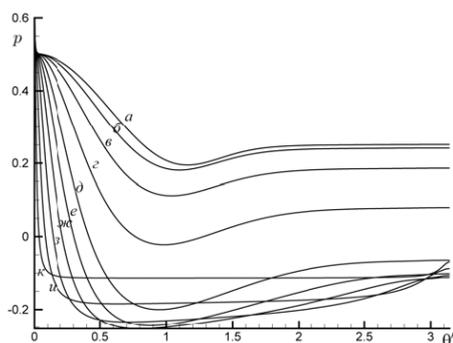


Рис. 1.5. Распределение давления на поверхности цилиндра при  $Re=900$

Обтекание цилиндра потоком несжимаемой жидкости, где кривая «а» соответствует круглому цилиндру, а кривые «б-к» эллиптическим цилиндрам в зависимости от изменения толщин эллипса.

Согласно [119], при обтекании цилиндра вязкой жидкостью в передней его части безотрывное распределение давления близко к экспериментальному. В кормовой части цилиндра течение резко отличается от картины, полученной в потенциальной теории, максимум давления расположен в передней (А) и задней (В) критических точках. Начиная от передней критической точки давление в направлении течения снижается до минимума, соответствующего углам  $\theta$ , равным  $90$  и  $270^\circ$ . Поэтому при обтекании вязкой жидкостью причин для отрыва пограничного слоя в передней части цилиндра нет. В кормовой же части цилиндра давление, согласно теоретическому решению, должно резко повышаться, что при обтекании вязкой жидкостью нереально: при значительном положительном градиенте давления пограничный слой срывается с поверхности цилиндра. В потоке за цилиндром образуется рециркуляционная зона со сложной вихревой структурой течения, что резко отличает реальную картину распределения давления в кормовой части цилиндра от теоретической (рис. 1.6).

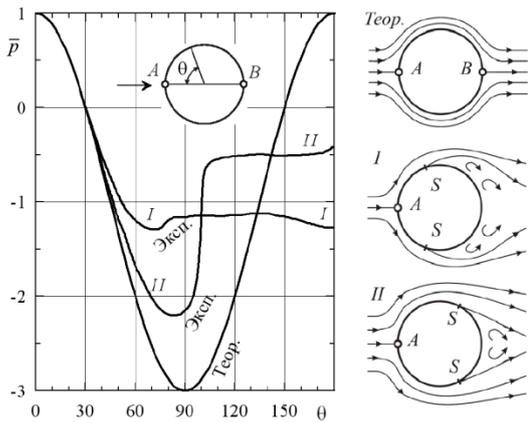


Рис. 1.6. Распределение давления в зонах I –  $Re \approx 100$ ; II –  $Re \approx 10^5$ .

В литературе [110] приведены результаты исследований при числах  $Re$ , соответствующих турбулентному режиму течения воздуха с учетом загромождения канала (рис. 1.7).

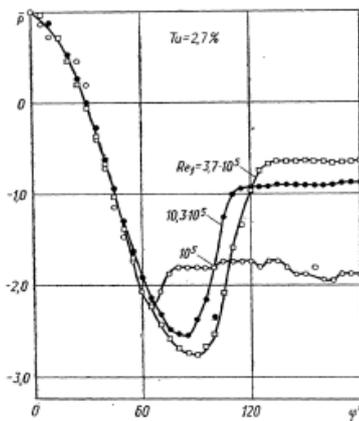


Рис. 1.7. Распределение давлений на поверхности цилиндра в потоке воздуха.

Во всех режимах обтекания давление в лобовой части цилиндра из-за ускорения потока падает до определенного значения, соответствующего распределению давления при потенциальном обтекании и не превышающего значения  $-3$ .

В работе [120] приведены величины среднего распределения давления для режимов течения  $Re = 3 \cdot 10^3$  и  $Re = 8 \cdot 10^3$  (рис. 1.8)

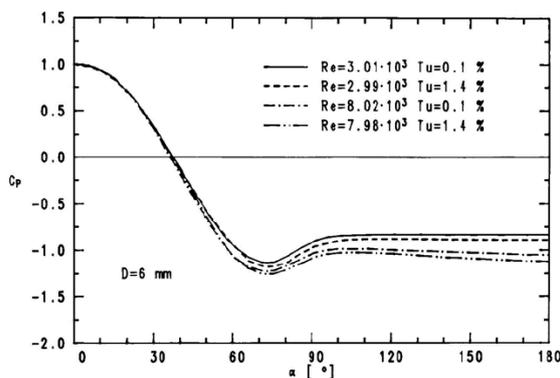


Рис. 1.8 Среднее распределение давление на поверхности цилиндра для режимов при  $Re = 3 \cdot 10^3$  и  $Re = 8 \cdot 10^3$

Авторами работы [121] приведены результаты эксперимента по определению среднего распределения давления для  $Re=3900$  при боковом обтекании цилиндра и результаты, полученные при трехмерном моделировании с применением различных моделей и методик (рис 1.9).

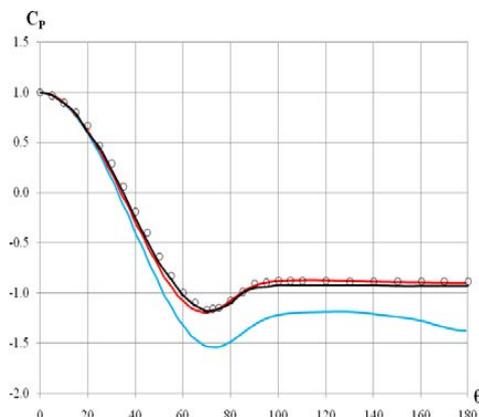


Рис. 1.9 Распределение давления на поверхности цилиндра для различных моделей при трехмерном моделировании: — модель SST; — модель SAS-SST; — LES с Bspline метод Кравченко и Моина; ○ результаты эксперимента.

Приведенные результаты анализа литературных источников позволяют сделать следующие выводы о применении этих данных в дальнейших исследованиях и математическом моделировании: либо строить линейные регрессии по уравнению, либо строить математическую зависимость по имеющимся данным.

### 1.7.3 Внутренние процессы, влияющие на теплообмен в теплоизоляционных конструкциях

Значительный интерес представляют работы [122-125] по изучению естественной конвекции и переноса тепла в пористых прослойках.

Следует отметить работу [122], в которой численно исследовалось влияние естественной конвекции на теплообмен в пористых кольцевых прослойках для стационарного режима. Для расчета поля течения и переноса тепла использовалось уравнение конвекции в приближении Буссинеска, где поверхностная сила была заменена эквивалентной объемной силой сопротивления в соответствии с законом Дарси.

Результатами численных исследований явилось определение изменение локальных чисел  $Nu_i(\varphi)$  вдоль внешней ( $i=2$ ) и внутренней ( $i=1$ ) поверхностей при  $Ra^* = 600$ ,  $r_2/r_1=2$  (рис. 1.10) и типичная картина стационарного движения и поля температур в рассматриваемой области при  $Ra^* = 1000$ ,

$r_2/r_1=2$  (рис. 1.11). Данные результаты соответствуют условиям, когда внешний цилиндр имеет более высокую температуру.

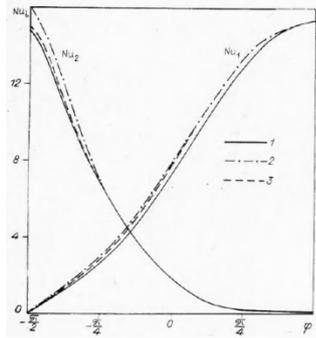


Рис. 1.10 Графики изменения локальных чисел  $Nu_i(\varphi)$  вдоль внешней ( $i=2$ ) и внутренней ( $i=1$ ) поверхностей при  $Ra^* = 600$ ,  $r_2/r_1=2$  для трех различных сеток (1 -  $22 \times 22$ , 2 -  $16 \times 30$ , 3 -  $17 \times 17$ ).

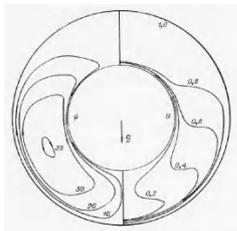


Рис. 1.11 Картина стационарного движения и поля температур в рассматриваемой области при  $Ra^* = 1000$ ,  $r_2/r_1=2$

В работе [122] так же установлено, что распределение местных чисел  $Nu$  вдоль внутренней и внешней границ области исследования при различных значениях фильтрационного числа Рэлея имеют различные значения, эта неравномерность потоков тепла на границах увеличивается с ростом  $Ra^*$  (рис. 1.12).

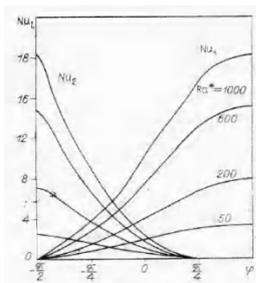


Рис. 1.12 Распределение местных чисел  $Nu$  вдоль внутренней и внешней границ при различных значениях фильтрационного числа  $Ra^*$  и  $r_2/r_1=2$

Такую же тенденцию стоит отметить при увеличении  $r_2/r_1$ , представленную на рис. 1.13 при  $Ra^* = 200$ .

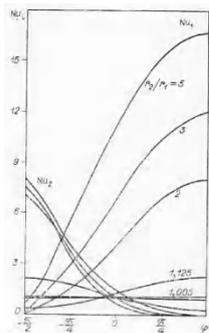


Рис.1.13. Распределение местных чисел  $Nu$  вдоль внутренней и внешней границ при различных значениях  $r_2/r_1$  и  $Ra^* = 200$

Результатами данных исследований и численных решений явилось то, что установлено наиболее сильная зависимость среднего теплового потока через слой от числа Рэлея и геометрии, а также имеет место существенно большая неравномерность распределения местных потоков тепла на границах исследуемой области. Поэтому, говоря о роли влияния естественной конвекции, нельзя не отметить коэффициент конвекции, равный отношению среднего потока тепла через прослойку, при наличии конвекции, к потоку тепла в режиме теплопроводности.

Дальнейшее изучение этой проблемы авторами проводилось в работе [123] и позволило рассмотреть нестационарный процесс течения и теплообмена вязкой несжимаемой жидкости в горизонтальном кольцевом канале при наличии постоянного теплового потока на его внешней поверхности. Исследования базировались на основе численного решения системы двумерных стационарных уравнений движения, неразрывности и энергии в полярной системе координат.

По результатам численного решения системы уравнений конвективно-го теплообмена в кольцевой прослойке было получено и графически изображено развитие во времени циркуляционного движения и изменения радиальной  $V_r$  и тангенциальной  $V_\varphi$  составляющих скорости в различных сечениях кольцевой области (рис. 1.14) и изменение во времени распределения температурных профилей при различных значениях полярного угла  $\varphi$  в режиме определенном числом  $Gr=10^4$ ,  $Pr=0,7$ ,  $r_2/r_1=2$  (рис. 1.15).



Рис. 1.14. Изменения составляющих скорости в кольцевой области при  
а)  $Fo=0,02$ ; б)  $Fo=1$ .

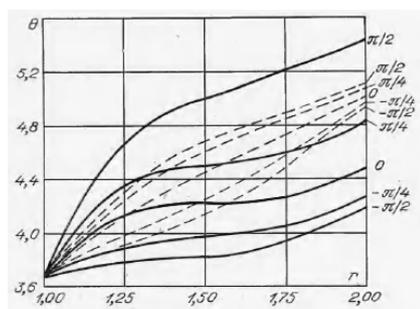


Рис. 1.15 Изменение во времени распределения температурных профилей (сплошные кривые соответствуют  $Fo=1$ , штриховые  $Fo=0,02$ ).

Так же были определены локальные числа  $Nu$  на границах области, которые были найдены через локальные разности температур между внешней и внутренней стенками при каждом значении  $\varphi$ , представленные на рис. 1.16.

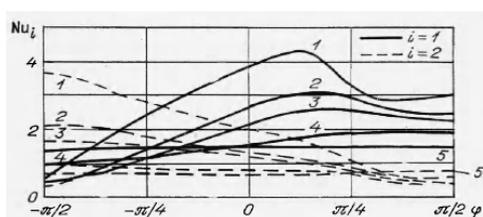


Рис. 1.16. Графики изменения  $Nu_i(\varphi)$  на внутренней и внешней стенках при различных числах  $Gr$  (1 –  $Gr=0,5 \cdot 10^5$ , 2 –  $Gr=10^4$ , 3 –  $Gr=0,5 \cdot 10^4$ , 4 –  $Gr=10^3$ , 5 – теплопроводность,  $Pr=0,7$   $r_2/r_1=2$ ).

Кроме того, в работе [123] приведена зависимость  $\varepsilon_k$  от числа  $Ra^*$  при стационарном режиме.

Изучение вопросов численных решений задач естественной конвекции показало, что результаты исследований, представленные в работе [124], являются продолжением поиска эффективных методов численного моделирования на основе нестационарных уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска. В данной работе произведен анализ и сравнение ранее известных численных данных и результатов тестовой задачи, которые охватывали широкий диапазон чисел Рэлея и набор характеристик течения и теплообмена.

Продолжением изучения в этой области явилась работа [125], где численно исследовалось структура распределения полей температуры и скорости, средние и локальные величины теплопереноса в прослойке между горизонтальными коаксиальными цилиндрами, заполненной анизотропным пористым материалом. Задача решалась с использованием трехмерного моделирования процессов протекания естественной конвекции, где рассматривались три различных режима течения и показано влияние на их формирование числа Рэлея, толщины слоя и коэффициента конвекции.



## 1.8 Выводы и постановка задач

Одним из способов энергосбережения в СТС является повышение их надежности и экономичности за счет снижения потерь тепловой энергии с поверхности изолированных трубопроводов. Состояние теплоизоляционной конструкции влияет на надежность работы СТС, поскольку потери тепловой энергии, возникающие в результате неудовлетворительного состояния теплоизоляционной конструкции, влияют на рост тарифов на тепловую энергию, перерасход топлива на источниках теплоснабжения ввиду снижения температуры теплоносителя и на покрытие потерь тепла. Некачественная изоляция является косвенной причиной возникновения коррозии на внешней поверхности трубопроводов, что в дальнейшем приводит к повреждению трубопроводной системы за счет возникновения свищей и к последующим потерям теплоносителя. На данный момент, в качестве тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей, а также в тепловых камерах после реконструкции и капитального ремонта, используются изделия на основе минерального волокна с защитным покрытием из стеклопластика или стеклоткани. В процессе эксплуатации волокнистая изоляция трубопроводов подвержена разрушению и потере теплозащитных свойств. Поэтому, необходимо защитить его от внешней влаги и воздуха наружным покрытием из материала с низким коэффициентом теплопроводности, высокой температуростойкостью, низким водопоглощением и низкой воздухопроницаемостью. Ввиду этого модернизация существующих конструкций теплоизоляции является актуальной задачей, а анализ литературных источников показал перспективность применения ТПП в качестве дополнительного покрытия в теплоизоляционной конструкции.

Однако данных о физико-технических и тепловых характеристиках ТПП в общей структуре изоляции в литературе отсутствует. Так же, нет данных об изменении состояния в процессе эксплуатации основного и покровного слоев тепловой изоляции, и влияния ТПП после нанесения, на общую картину тепловых процессов, протекающих в толще теплоизоляционной кон-

струкции в зависимости от исходного состояния основного и покровного слоев. В связи с этим, исследование тепловых характеристик теплоизоляционной конструкции с ТПП и теплообменных процессов, протекающих в такой многослойной изоляции, является актуальной задачей. Также, необходимо произвести математическое моделирование тепловых процессов в многослойной теплоизоляционной конструкции с применением пористого материала и покровного слоя с нанесенным ТПП. Экспериментально проверить данную математическую модель.

В данной работе предметом специального изучения является экспериментальное исследование и теоретическое обоснование эффекта энергосбережения при нанесении ТПП на поверхность традиционной тепловой изоляции СТС, состоящей из минеральной ваты, используемой в качестве основного изоляционного слоя и стеклопластика, в качестве покровного слоя.

Осуществить оценку эффективности и технико-экономическую оценку применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов СТС на примере поселка Осиново Зеленодольского района Республики Татарстан.

Необходимо определить влияние применения ТПП на совокупный системный эффект объекта распределенной энергетики энерготехнологического комплекса «Майский».

## ГЛАВА 2. Экспериментальные исследования тепловых процессов в теплоизоляционной конструкции с ТПП

### 2.1 Определение теплофизических свойств теплоизоляционной конструкции с ТПП

С целью более детального изучения влияния ТПП в конструкции тепловой изоляции трубопроводов на снижение потерь тепловой энергии провели эксперименты по исследованию теплопроводности, теплового излучения и воздухопроницаемости теплоизоляционной конструкции.

#### 2.1.1 Исследование теплопроводности теплоизоляционной конструкции с ТПП

##### 2.1.1.1 Методика проведения эксперимента

Для исследования величины теплопроводности теплоизоляционной конструкции была выбрана методика стационарного теплового потока, проходящего через исследуемый плоский образец. По величине этого теплового потока, температуре противоположных граней образца и его толщине вычислили теплопроводность образца  $\lambda$  по формуле

$$\lambda = \frac{d \cdot q}{\Delta T}, \quad (2.1)$$

где  $d$  - толщина образца;

$q$  - плотность теплового потока, проходящего через образец;

$\Delta T$  - разность температур между противоположными гранями образца.

Тепловое сопротивление  $R$  образца вычислили по формуле

$$R = \frac{\Delta T}{q}, \quad (2.2)$$

Исследуемый образец должен иметь форму прямоугольного параллелепипеда, лицевые грани которого представляют собой форму квадрата с размерами 150x150 мм. Толщина образца должна находиться в пределах 10...25 мм.

Для оценки величины коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции с тонкопленочным покрытием использовали прибор-измеритель теплопроводности ИТС-1 [127]. Прибор ИТС-1 предназначен для измерения теплопроводности и теплового сопротивления строительных и теплоизоляционных

материалов методом стационарного теплового потока в соответствии с ГОСТ 7076-99, внесенный в Государственный реестр средств измерений РФ №34080-07 (рис. 1).



Рис. 2.1. Измеритель теплопроводности ИТС-1

#### 2.1.1.2 Описание экспериментальных исследований

Прибор состоит из измерительной ячейки (теплозащитный кожух, нагреватель и холодильник) и электронного блока размещенных в едином корпусе (рис. 2.1).

Для измерений изготавливали образцы в виде прямоугольного параллелепипеда, наибольшие грани которого имеют форму квадрата с размерами 150x150 мм и толщиной образцов в диапазоне 10...25 мм.

Грани образца, контактирующие с рабочими поверхностями плит прибора, должны быть плоскими и параллельными. Отклонение лицевых граней жесткого образца от параллельности не должно быть более 0,5 мм.

Жесткие образцы, имеющие разнотолщинность и отклонения от плоскости, подвергли шлифованию.

Толщину образцов измерили штангенциркулем с погрешностью не более 0,1 мм в четырех углах на расстоянии  $(50,0 \pm 5,0)$  мм от вершины угла и посередине каждой стороны.

За толщину образца приняли среднеарифметическое значение результатов всех измерений.

При проведении исследования учитывали, что при изменении теплопроводности наибольший вклад в погрешность вносят боковые потери, обусловленные неидеальностью тепловой изоляции, измерительной ячейки и тепловое сопротивление

ление переходов образец-нагреватель и образец-холодильник, вызванные неплоскостью рабочих поверхностей образца.

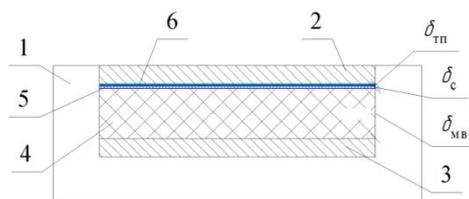


Рис. 2.2 Схема проведения измерений: 1 – измеритель теплопроводности ИТС-1; 2 – нагреватель; 3 – холодильник; 4 – минеральная вата М-100; 5 – стеклопластик РСТ-140; 6 – ТПП

Исследуемая теплоизоляционная конструкция представляет собой трехслойный образец квадратного сечения 150x150 мм (рис. 2.2), толщиной 25 мм, состоящий из минеральной ваты М-100  $\delta_{МВ}$  (4), стеклопластика рулонного РСТ-140  $\delta_c$  (5) и ТПП  $\delta_{ТП}$  (6), нанесенного на стеклопластик, находящаяся в измерительной ячейке измерителя теплопроводности ИТС-1 (1). Размеры исследуемого образца теплоизоляционной конструкции соответствуют размерам нагревателя (2) и холодильника (3). Отдельные слои теплоизоляционной конструкции плотно прилегают друг к другу, не образуя воздушного зазора, а наружные поверхности исследуемого образца граничат с рабочими поверхностями нагревателя (2), холодильника (3) и измерителя теплопроводности ИТС-1 (1).

### 2.1.1.3 Результаты и выводы

Результаты проведенных исследований коэффициента теплопроводности образца теплоизоляционной конструкции с нанесенным ТПП и без него представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Результаты измерений коэффициента теплопроводности  $\lambda$ , Вт/(м·К) теплоизоляционной конструкции

| № изм. | Коэффициент теплопроводности теплоизоляционной конструкции $\lambda$ , Вт/(м·К) |   |   |   |
|--------|---|---|---|---|
|        | Мин. вата + стеклопластик   | Мин. вата + стеклопластик + ТПП 1 слой (1,0 мм) | Мин. вата + стеклопластик + ТПП 2 слоя (1,5 мм) | Мин. вата + стеклопластик + ТПП 3 слоя (2,0 мм) |
| 1      | $42,70 \cdot 10^{-3}$   | $43,09 \cdot 10^{-3}$                           | $43,48 \cdot 10^{-3}$                           | $44,29 \cdot 10^{-3}$                           |
| 2      | $42,69 \cdot 10^{-3}$   | $43,11 \cdot 10^{-3}$                           | $43,47 \cdot 10^{-3}$                           | $44,29 \cdot 10^{-3}$                           |

|   |                       |                       |                       |                       |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 3 | $42,71 \cdot 10^{-3}$ | $43,11 \cdot 10^{-3}$ | $43,48 \cdot 10^{-3}$ | $44,30 \cdot 10^{-3}$ |
| 4 | $42,71 \cdot 10^{-3}$ | $43,08 \cdot 10^{-3}$ | $43,46 \cdot 10^{-3}$ | $44,29 \cdot 10^{-3}$ |
| 5 | $42,68 \cdot 10^{-3}$ | $43,09 \cdot 10^{-3}$ | $43,49 \cdot 10^{-3}$ | $44,28 \cdot 10^{-3}$ |

Погрешность при проведении измерений составила  $\pm 5\%$  при погрешности измерителя теплопроводности ИТС-1  $\pm 5\%$  и штангенциркуля ШЦ-1-125-0,05  $\pm 6\%$ .

Исходя из полученных данных, в результате проведенных измерений, можно констатировать, что после нанесения ТПП на поверхность теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в качестве покровного слоя, среднее значение коэффициента теплопроводности составило  $42,70 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К), с ТПП в 1 слой  $43,10 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К), с ТПП в 2 слоя  $43,49 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К) и в 3 слоя  $44,29 \cdot 10^{-3}$  Вт/(м·К). В процентном соотношении, изменение коэффициента теплопроводности, после нанесения ТПП, увеличилось на 1%, 2% и 4% в соответствии с количеством нанесенных слоев.

#### 2.1.1.4 Оценка погрешности измерений коэффициента теплопроводности

С целью оценки случайной погрешности многократных измерений результатов коэффициента теплопроводности, выполнили следующие расчеты по методике [128].

2.1.1.4.1 Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в виде покровного слоя.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,042698 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\bar{x}-x_1)^2 + (\bar{x}-x_2)^2 + \dots + (\bar{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 5,831 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/(м·К)}.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma}=1,6189\cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{он}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{он}}^2} = \sqrt{(1,6189 \cdot 10^{-5})^2 + 0,0021349^2} = 0,00213496 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 5,00014376 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (0,04270 \pm 0,00213) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \sigma = 5,0\%; \alpha = 0,95.$$

2.1.1.4.2 Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в 1 слой.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,043096 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma}=1,6659\cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{он}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{он}}^2} = \sqrt{(1,6659 \cdot 10^{-5})^2 + 0,0021548^2} = 0,00215486 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta \tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 5,00014942 \%$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (0,04310 \pm 0,00215) \text{ Вт/(м·К)}; \sigma = 5,0\%; \alpha = 0,95.$$

2.1.1.4.3 Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ГПП в 2 слоя.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,043476 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 5,099 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/(м·К)}.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta \tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 1,4157 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/(м·К)} \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{\text{он}}$ :

$$\Delta \tilde{x} = \sqrt{\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta \tilde{x}_{\text{он}}^2} = \sqrt{(1,4157 \cdot 10^{-5})^2 + 0,0021738^2} = 0,00217385 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta \tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 5,00010603 \%$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (0,04348 \pm 0,00217) \text{ Вт/(м·К)}; \sigma = 5,0\%; \alpha = 0,95.$$

2.1.1.4.4 Расчет погрешности прямых измерений коэффициента теплопроводности теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ГПП в 3 слоя.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 0,044290 \text{ Вт/(м·К)}.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2+(\tilde{x}-x_2)^2+\dots+(\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n(\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 3,1623 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 8,7799 \cdot 10^{-6} \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)} \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{(8,7799 \cdot 10^{-6})^2 + 0,0022145^2} = 0,00221452 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 5,0000393 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (0,04429 \pm 0,00221) \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}; \sigma = 5,0\%; \alpha = 0,95.$$

## 2.1.2 Исследование теплового излучения теплоизоляционной конструкции с ТПП

С целью определения интегрального коэффициента излучения необходимо найти значение интегральной составляющей теплового потока излучения поверхности теплоизоляционной конструкции, которое определяется экспериментально.

Для нахождения интегрального коэффициента излучения различных поверхностей применимы целый ряд известных методов и разнообразных экспериментальных установок, представленных в литературных источниках [129-133].

Радиационный метод основан на сравнении излучения исследуемого тела с излучением абсолютно черного или другого тела с известным коэффициентом излучения. В нашей работе определение интегрального коэффициента излучения  $\epsilon$  радиационным методом состоит в сравнительном измерении специальным термодатчиком лучистой энергии, испускаемым исследуемой теплоизоляционной конструкцией с нанесенным ТПП и коэффициента излучения покровного слоя

традиционной тепловой изоляцией тепловой сети, в качестве которого использован стеклопластик.

При проведении экспериментальных исследований для определения  $\epsilon$  радиационным методом в качестве термоприемника применили радиометр неселективный «Аргус-03» [134]. Этот прибор предназначен для измерения энергетической освещенности (рис. 2.3). Энергетическая освещенность или интенсивность теплового излучения, позволяет определить плотность теплового потока излучения.



Рис. 2.3. Радиометр неселективный «Аргус-03»

#### 2.1.2.1 Методика проведения эксперимента

Принцип работы прибора основан на преобразовании потока излучения, создаваемого источниками, в непрерывный электрический сигнал, пропорциональный энергетической освещенности, который затем преобразуется аналого-цифровым преобразователем в цифровой код, индуцируемый на цифровом табло индикаторного блока.

В измерительной головке расположен первичный преобразователь излучения – термоэлемент для преобразования энергетической освещенности.

Расчет значений энергетической освещенности, измеренной радиометром, осуществляли по формуле:

$$E = U_0 - U_T, \quad (2.3)$$

где  $U_0$  и  $U_T$  - показания радиометра при открытой и закрытой головке, соответственно.

#### 2.1.2.2 Описание экспериментальных исследований

Эксперимент проводился на подающем трубопроводе тепловой сети наружным диаметром 133 мм, находящимся в подвале Казанского государственного

энергетического университета. Теплоизоляционная конструкция трубопровода состояла из минераловатной изоляции марки М-100 толщиной 60 мм, покровный слой был выполнен из стеклопластика рулонного марки РСТ-140. На покровный слой теплоизоляционной конструкции действующего трубопровода было нанесено ТПП. Температура теплоносителя, на момент исследования, составила  $70,1^{\circ}\text{C}$ , что соответствует температуре сетевой воды при температуре наружного воздуха  $5^{\circ}\text{C}$ , согласно температурного графика  $150-70^{\circ}\text{C}$ , со срезкой  $135-65^{\circ}\text{C}$ . Температура окружающей среды  $30^{\circ}\text{C}$ . Температура поверхности изоляции с нанесенным ТПП составила  $26,7^{\circ}\text{C}$  и температура поверхности с традиционной изоляцией  $28^{\circ}\text{C}$  соответственно (рис. 2.4).

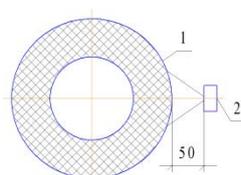


Рис. 2.4. Схема проведения эксперимента: 1 – изолированный трубопровод тепловой сети; 2 – измерительная головка прибора «Аргус-03»

Измерительную головку прибора устанавливали параллельно измеряемой поверхности под углом наклона  $90^{\circ}$ . Фоновый показатель энергетической освещенности составил  $8 \text{ Вт/м}^2$ . Расстояние от измерительной головки прибора до исследуемой поверхности составил 50 мм. Замеры проводились пятикратно с трех сторон трубопровода – сверху, снизу и сбоку, рис. 2.5.

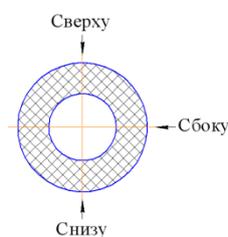


Рис. 2.5. Расположение прибора «Аргус-03» относительно трубопровода тепловой сети при проведении экспериментального исследования

### 2.1.2.3 Результаты и выводы

Результаты проведенного эксперимента по определения величины плотности теплового потока излучения трубопровода с традиционной тепловой изоляцией, состоящей: «минеральная вата + стеклопластик» и «минеральная вата + стеклопластик + ТПП», представлены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Результаты измерений плотности теплового потока излучения, Вт/м<sup>2</sup> теплоизоляционной конструкции

| Расположение измерительной головки / № изм. | Плотность теплового потока излучения, Вт/ м <sup>2</sup> |    |    |    |    |                                 |    |    |    |    |
|---|--|----|----|----|----|---------------------------------|----|----|----|----|
|   | Мин. вата + стеклопластик                                |    |    |    |    | Мин. вата + стеклопластик + ТПП |    |    |    |    |
|   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 1                               | 2  | 3  | 4  | 5  |
| Снизу                                       | 14   | 15 | 15 | 17 | 16 | 13                              | 15 | 16 | 14 | 15 |
| Сбоку                                       | 23   | 23 | 23 | 22 | 23 | 23                              | 22 | 23 | 23 | 22 |
| Сверху                                      | 34   | 35 | 33 | 33 | 34 | 33                              | 33 | 34 | 32 | 34 |

Как видно из табл. 2.2, средние величины плотности теплового потока излучения традиционной изоляции в зависимости от месторасположения прибора составили 15,4 Вт/м<sup>2</sup> – снизу, 22,8 Вт/м<sup>2</sup> – сбоку и 33,8 Вт/м<sup>2</sup> сверху, результаты замеров с ТПП 14,6; 22,6 и 33,2 Вт/м<sup>2</sup>, соответственно. В совокупном рассмотрении влияния ТПП на изменение плотности теплового потока излучения носит незначительный характер. Очевидно, данный эффект объясняется протеканием тепловых процессов, т.е. конвективным распределением теплоток в толще тепловой изоляции.

Для нахождения интегрального коэффициента излучения в зависимости от температуры  $T_i$  использовали формулу (2.4) [135].

$$\varepsilon(T_i) = \varepsilon_e \frac{Q(T_i)}{Q_e(T_i)}, \quad (2.4)$$

где  $Q(T_i)$ ,  $Q_e(T_i)$  - измеренные значения мощности излучения при температуре  $T_i$  исследуемой поверхности с нанесенным ТПП и поверхности с традиционной тепловой изоляцией - минеральная вата и покровный слой из стеклопластика, соответственно;  $\varepsilon_e$  - коэффициент излучения стеклопластика (принят  $\varepsilon_e=0,90$ ).

В табл. 2.3 представлены величины интегрального коэффициента излучения, рассчитанные по формуле (2.4).

Таблица 2.3. Значения интегрального коэффициента излучения  $\epsilon$  теплоизоляционной конструкции с нанесенным ТПП

| Расположение измерительной головки | Интегральный коэффициент излучения $\epsilon$ |      |      |      |      |
|------------------------------------|---|------|------|------|------|
|                                    | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    |
| Снизу                              | 0,84  | 0,90 | 0,96 | 0,74 | 0,84 |
| Сбоку                              | 0,90  | 0,86 | 0,90 | 0,94 | 0,86 |
| Сверху                             | 0,87  | 0,85 | 0,93 | 0,87 | 0,90 |

Как видно из табл. 2.3, среднее значение коэффициента излучения  $\epsilon$  в зависимости от месторасположения прибора при проведении эксперимента составило 0,88.

Таким образом, полученные экспериментальные данные показали, что интегральный коэффициент излучения ТПП на поверхности тепловой изоляции незначительно отличается от интегрального коэффициента излучения стеклопластика, выступающего в качестве покровного слоя традиционной тепловой изоляции исследуемого участка трубопровода тепловой сети.

#### 2.1.2.4 Оценка погрешности измерений теплового излучения

2.1.2.4.1 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в нижней области измерений.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 15,4 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\bar{x}-x_1)^2 + (\bar{x}-x_2)^2 + \dots + (\bar{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,509902 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta \tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 1,415715 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{1,415715^2 + 0,924^2} = 1,690569 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 10,97772 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (15,40 \pm 1,69) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 11,0\%; \alpha = 0,95.$$

2.1.2.4.2 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в боковой области измерений.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 22,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,2 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 0,555289 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{0,555289^2 + 1,368^2} = 1,476404 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 6,475458 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (22,80 \pm 1,48) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 6,5\%; \alpha = 0,95.$$

2.1.2.4.3 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика в верхней области измерений.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 33,8 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\bar{x}-x_1)^2 + (\bar{x}-x_2)^2 + \dots + (\bar{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,374166 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 1,038851 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{1,038851^2 + 2,028^2} = 2,278595 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\bar{x}} \cdot 100\% = 6,741405 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (33,80 \pm 2,28) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 6,7\%; \alpha = 0,95.$$

2.1.2.4.4 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ГПП в нижней области измерений.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 14,6 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\bar{x}-x_1)^2 + (\bar{x}-x_2)^2 + \dots + (\bar{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,509902 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 1,415715 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{1,415715^2 + 0,876^2} = 1,66482 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 11,40287 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (14,60 \pm 1,66) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 11,4 \text{ \%}; \alpha = 0,95.$$

2.1.2.4.5 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в боковой области измерений.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 22,6 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,244949 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 0,680087 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{0,680087^2 + 1,356^2} = 1,516989 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta \tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 6,71234 \%$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (22,60 \pm 1,52) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 6,7 \%; \alpha = 0,95.$$

2.1.2.4.6 Расчет погрешности прямых измерений теплового излучения теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в верхней области измерений.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 33,2 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,374166 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=5$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,77644511$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta \tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 1,038851 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta \tilde{x} = \sqrt{\Delta \tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta \tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{1,038851^2 + 1,992^2} = 2,246614 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta \tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 6,76691 \%$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (33,20 \pm 2,25) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 6,8 \%; \alpha = 0,95.$$

2.1.3 Исследование воздухопроницаемости теплоизоляционной конструкции с нанесенным ТПП.

Целью данного исследования является экспериментальная оценка воздухопроницаемости стеклопластика и установление зависимости воздухопроницаемости от нанесенного на его поверхность ТПП в зависимости от количества слоев.

### 2.1.3.1 Методика проведения эксперимента

В основе метода определения воздухопроницаемости лежит установление времени прохождения определенного объема воздуха через исследуемый образец при известном давлении воздуха.

Схема установки для определения воздухопроницаемости представлена на рис. 2.6.

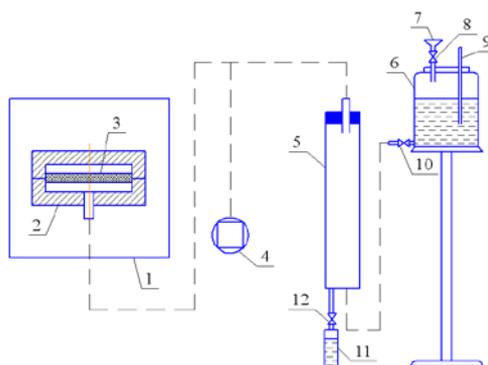


Рис. 2.6. Схема установки для определения воздухопроницаемости

В патрон 2, находящийся в термостате 1, поместили образец 3. Заданный объем воздуха ( $100 \text{ см}^3$ ), который необходимо пропустить через образец, вытесняется водой из градуированной бюретки 5. Вода в бюретку поступает из сосуда 6 через вертикально расположенную внутри бюретки трубку. Перепад давлений воздуха между основаниями образца измеряли измерителем давления ПРОМА ИДМ 4.

Прибор ПРОМА ИДМ 4 [136], выполняет функции преобразования измеряемого давления в токовый сигнал, а также выдачу на регистрацию или регулирование, индикацию текущего значения измеряемого давления на цифровом светодиодном индикаторе.

### 2.1.3.2 Описание экспериментальных исследований

В сосуд 6 через воронку 7 заливали воду так, чтобы конец трубки 9 был погружен в воду на 20-30 см. После этого кран 8 закрывали. Проверяется нулевое положение указателя измерителя давления ПРОМА ИДМ 4. Сосуд 6 на подвижной платформе устанавливали на высоту, обеспечивающую необходимый перепад

давления. Далее открывали кран 10, таким образом, воздух, из бюретки вытесняясь водой, проходил через испытуемый образец. В момент достижения уровня воды в бюретке нижней – нулевой – отметки включали секундомер. Одновременно отмечали показание измерителя давления  $\Delta P$ , которое в течение опыта практически не изменялось. Секундомер останавливали в тот момент, когда вода в бюретке достигала уровня, соответствующего отметке 100 см<sup>3</sup>. Затраченное на прохождение через образец 100 см<sup>3</sup> воздуха время фиксировали. Также фиксировали давление воздуха в конце опыта, которое для расчета усредняли. После завершения опыта воду через кран 12 сливали в емкость 11.

Изменение давления воздуха производили изменением высоты расположения сосуда с водой 6, причем рекомендуется такой диапазон изменения  $P$ , который обеспечивает прохождение через испытуемый образец 100 см<sup>3</sup> воздуха за время 1-3 мин.

Для обеспечения требуемой температуры патрон с образцом подсоединяли к установке, помещали в термостат и выдерживали там 20 мин.

### 2.1.3.3 Результаты и выводы

Обработка результатов эксперимента заключается в следующем.

На основании данных исследований сначала определили объемный расход воздуха в м<sup>3</sup>/с при каждом измерении по формуле [137]

$$W_0 = V/z_i, \quad (2.5)$$

где  $V$  - объем воздуха, м<sup>3</sup>;  $z_i$  - время  $i$ -го измерения, с.

Для сравнения данных, полученных при разных температурных условиях, производили перерасчет по формуле

$$W_B = \rho \cdot W_0, \quad (2.6)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха при атмосферном давлении и температуре эксперимента, кг/м<sup>3</sup>, рассчитывали по формуле

$$\rho = \rho_0 / (1 + t_B / 273), \quad (2.7)$$

где  $\rho_0 = 1,293$  кг/м<sup>3</sup> - плотность воздуха при температуре  $t_B = 0^\circ\text{C}$ ;  $t_B$  - температура воздуха помещения во время проведения эксперимента,  $^\circ\text{C}$ .

Коэффициент воздухопроницаемости исследуемого материала для всех значений перепада давлений  $\Delta P_i$ , Па, вычисляли по формуле

$$i = (W_B \cdot \delta \cdot 3600) / (\Delta P_i \cdot F), \quad (2.8)$$

где  $\delta$  толщина исследуемого образца, м;  $F$  площадь рабочего сечения образца, через которое проходит воздух, м<sup>2</sup>.

Результаты измерений и расчетов воздухопроницаемости стеклопластика с нанесенным ТПП и без него представлены в табл. 2.4.

Таблица 2.4. Результаты измерений и расчеты воздухопроницаемости исследуемых образцов

| № изм.   | V, м <sup>3</sup> | $\Delta P$ , Па | $z_i$ , с | $\rho$ при $t_B$ | $W_0$ , м <sup>3</sup> /с | $W_B$ , м <sup>3</sup> /с | $i$ , кг/м·ч·Па      | Погрешность, % |
|--|-------------------|-----------------|-----------|------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------|----------------|
| Образцы без ТПП (при $t_B=25^\circ\text{C}$ )        |                   |                 |           |                  |                           |                           |                      |                |
| 1  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 120             | 11,03     | 1,18             | $9,07 \cdot 10^{-6}$      | $1,07 \cdot 10^{-5}$      | $2,05 \cdot 10^{-3}$ | 22             |
| 2  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 140             | 9,51      | 1,18             | $1,05 \cdot 10^{-5}$      | $1,25 \cdot 10^{-5}$      | $2,04 \cdot 10^{-3}$ | 20             |
| 3  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 170             | 8,91      | 1,18             | $1,12 \cdot 10^{-5}$      | $1,33 \cdot 10^{-5}$      | $1,79 \cdot 10^{-3}$ | 18             |
| 4  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 140             | 9,73      | 1,18             | $1,03 \cdot 10^{-5}$      | $1,22 \cdot 10^{-5}$      | $1,99 \cdot 10^{-3}$ | 20             |
| 5  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 162             | 8,82      | 1,18             | $1,13 \cdot 10^{-5}$      | $1,34 \cdot 10^{-5}$      | $1,90 \cdot 10^{-3}$ | 19             |
| 6  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 100             | 12,30     | 1,18             | $8,13 \cdot 10^{-6}$      | $9,63 \cdot 10^{-6}$      | $2,21 \cdot 10^{-3}$ | 24             |
| Образцы с ТПП в 1 слой (при $t_B=20^\circ\text{C}$ ) |                   |                 |           |                  |                           |                           |                      |                |
| 1  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 245             | 11,8      | 1,20             | $8,47 \cdot 10^{-6}$      | $1,02 \cdot 10^{-5}$      | $1,34 \cdot 10^{-3}$ | 11             |
| 2  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 255             | 11,88     | 1,20             | $8,41 \cdot 10^{-6}$      | $1,01 \cdot 10^{-5}$      | $1,28 \cdot 10^{-3}$ | 11             |
| 3  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 245             | 11,88     | 1,20             | $8,41 \cdot 10^{-6}$      | $1,01 \cdot 10^{-5}$      | $1,33 \cdot 10^{-3}$ | 11             |
| 4  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 205             | 16,5      | 1,20             | $6,06 \cdot 10^{-6}$      | $7,30 \cdot 10^{-6}$      | $1,14 \cdot 10^{-3}$ | 13             |
| 5  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 200             | 16,7      | 1,20             | $5,99 \cdot 10^{-6}$      | $7,21 \cdot 10^{-6}$      | $1,16 \cdot 10^{-3}$ | 13             |
| 6  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 200             | 16,2      | 1,20             | $6,17 \cdot 10^{-6}$      | $7,44 \cdot 10^{-6}$      | $1,19 \cdot 10^{-3}$ | 13             |
| Образцы с ТПП в 2 слоя (при $t_B=25^\circ\text{C}$ ) |                   |                 |           |                  |                           |                           |                      |                |
| 1  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2276            | 45,36     | 1,18             | $2,20 \cdot 10^{-6}$      | $2,61 \cdot 10^{-6}$      | $5,26 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 2  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2153            | 47,98     | 1,18             | $2,08 \cdot 10^{-6}$      | $2,47 \cdot 10^{-6}$      | $5,26 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 3  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2600            | 42,43     | 1,18             | $2,36 \cdot 10^{-6}$      | $2,79 \cdot 10^{-6}$      | $4,92 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 4  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2545            | 42,45     | 1,18             | $2,36 \cdot 10^{-6}$      | $2,79 \cdot 10^{-6}$      | $5,03 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 5  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2284            | 46,10     | 1,18             | $2,26 \cdot 10^{-6}$      | $2,68 \cdot 10^{-6}$      | $5,39 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 6  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2195            | 44,16     | 1,18             | $2,26 \cdot 10^{-6}$      | $2,68 \cdot 10^{-6}$      | $5,60 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| Образцы с ТПП в 3 слоя (при $t_B=25^\circ\text{C}$ ) |                   |                 |           |                  |                           |                           |                      |                |
| 1  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2519            | 81,81     | 1,18             | $1,22 \cdot 10^{-6}$      | $1,45 \cdot 10^{-6}$      | $4,22 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 2  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2475            | 83,92     | 1,18             | $1,19 \cdot 10^{-6}$      | $1,41 \cdot 10^{-6}$      | $4,18 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 3  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2479            | 86,26     | 1,18             | $1,16 \cdot 10^{-6}$      | $1,37 \cdot 10^{-6}$      | $4,06 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 4  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2465            | 82,54     | 1,18             | $1,21 \cdot 10^{-6}$      | $1,44 \cdot 10^{-6}$      | $4,27 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 5  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2477            | 84,47     | 1,18             | $1,18 \cdot 10^{-6}$      | $1,40 \cdot 10^{-6}$      | $4,15 \cdot 10^{-5}$ | 11             |
| 6  | $1 \cdot 10^{-4}$ | 2478            | 85,14     | 1,18             | $1,17 \cdot 10^{-6}$      | $1,39 \cdot 10^{-6}$      | $4,12 \cdot 10^{-5}$ | 11             |

В результате проведенных расчетов по определению воздухопроницаемости образцов стеклоткани РСТ-140 без ТПП и с нанесенным ТПП, средние значения воздухопроницаемости составили:

- образцы без ТПП  $1,99 \cdot 10^{-3}$  кг/м·ч·Па;

- образцы с ТПП в 1 слой  $1,24 \cdot 10^{-3}$  кг/м·ч·Па;
- образцы с ТПП в 2 слоя  $5,24 \cdot 10^{-5}$  кг/м·ч·Па;
- образцы с ТПП в 3 слоя  $4,17 \cdot 10^{-5}$  кг/м·ч·Па.

Как видно из полученных результатов, воздухопроницаемость рассмотренных образцов значительно снизилась после нанесения ТПП.

Следует отметить работу [138], в которой приведены результаты исследований проницаемости волокнистых теплоизоляционных материалов от плотности и марки тепловой изоляции. С целью сопоставления результатов, представленных в данной работе и полученных нами при проведении экспериментальных исследований, полученные коэффициенты проницаемости рассмотрели с точки зрения воздухопроницаемости, которые составили:

- стекловата марки URSA M-11 (плотностью 9-13 кг/м<sup>3</sup>) -  $1,07 \cdot 10^{-2}$  кг/м·ч·Па;
- стекловата марки ТИСМА M-25 (плотностью 21-29 кг/м<sup>3</sup>) –  $8,14 \cdot 10^{-3}$  кг/м·ч·Па;
- стекловата ИЗОМИН ЛАЙТ (плотностью 35 кг/м<sup>3</sup>) –  $6,51 \cdot 10^{-3}$  кг/м·ч·Па.

В соответствии с представленными данными, можно отметить, что воздухопроницаемость стеклопластика сопоставима с воздухопроницаемостью волокнистых теплоизоляционных материалов.

2.1.3.4 Расчет погрешности косвенных измерений воздухопроницаемости теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП в соответствии с методикой [128].

Выполнили оценку погрешности прямых измерений всех непосредственно измеряемых величин, входящих в формулу для искомой величины, с учетом погрешности многократных измерений. При этом для всех измеряемых величин задали одно и то же значение доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ .

С помощью средних значений измеряемых величин  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m$  рассчитали значение искомой величины  $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \dots, \tilde{x}_m)$ .

Получили выражение для погрешности косвенных измерений по формуле

$$\Delta\tilde{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{x}_i}\right)^2 \Delta\tilde{x}_i^2}.$$

Окончательный результат представили в виде  $y = \tilde{y} \pm \Delta\tilde{y}$

с доверительной вероятностью  $\alpha$ .

Относительную погрешность искомой величины определили по формуле

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{y}}{\tilde{y}} \cdot 100\%.$$

Результаты расчетов представлены в табл. 2.4.

## 2.2 Определение эффективности применения ТПП на модельном участке поверхности трубопровода

Целью данного исследования является экспериментальная оценка эффективности применения ТПП на поверхности традиционной изоляции трубопроводов, применяемых в системах теплоснабжения. В основу эксперимента положено определение плотности тепловых потоков, проходящих через конструкцию тепловой изоляции трубопровода на основе метода неограниченного цилиндрического слоя. Нами разработана схема и сконструирована экспериментальная установка, которая позволяет смоделировать реальные условия работы трубопроводов систем теплоснабжения.

### 2.2.1 Методика проведения эксперимента

Экспериментальная установка (рис. 2.7) состоит из измерительного участка, представляющего собой металлическую цилиндрическую трубу - 1, на наружной поверхности которой расположили теплоизоляционную конструкцию, состоящую из минеральной ваты марки М-100 - 2, покровного слоя из стеклопластика рулонного РСТ-140 - 3 и нанесенного на него ТПП - 4. Длина трубы составляет 1500 мм с наружным диаметром 108 мм. Внутри трубы заложен электрический нагреватель ТЭН - 5, создающий равномерный обогрев. Регулирование температуры внутри трубы осуществляли с помощью лабораторного автотрансформатора - 6, измерение нагрева автотрансформатора осуществляли с помощью анализатора

качества электроэнергии AR.5 - 7. Температуры исследуемых поверхностей измеряли платиновыми датчиками температуры (ПДТ), которые расположили на наружной и на внутренней поверхностях изолированного слоя. Слой изоляции плотно прилегал к поверхности трубы, поэтому датчики, которыми измеряли температуру внутренней поверхности, плотно устанавливали на измеряемую поверхность. Для этого, на рабочую поверхность датчика температуры и на место его установки, наносили термопасту КПТ-8, с целью устранения воздушного зазора и фиксирования датчика на поверхности, согласно [139].

По такому же принципу установили на исследуемую поверхность датчики теплового потока (ДТП). Одномерность теплового потока в экспериментальной установке обеспечили выбором длины трубы, значительно большей, чем ее внешний диаметр (отношение их приблизительно равно 20). Кроме того, на торцах трубы установили заглушки 9, которые так же, как и участок трубы, защищены слоем тепловой изоляции, а датчики температуры и датчики теплового потока установили в средней части трубы и на равноудаленных расстояниях от средней части, для получения более достоверной информации о распределении температур и плотности тепловых потоков по всей длине измерительного участка.

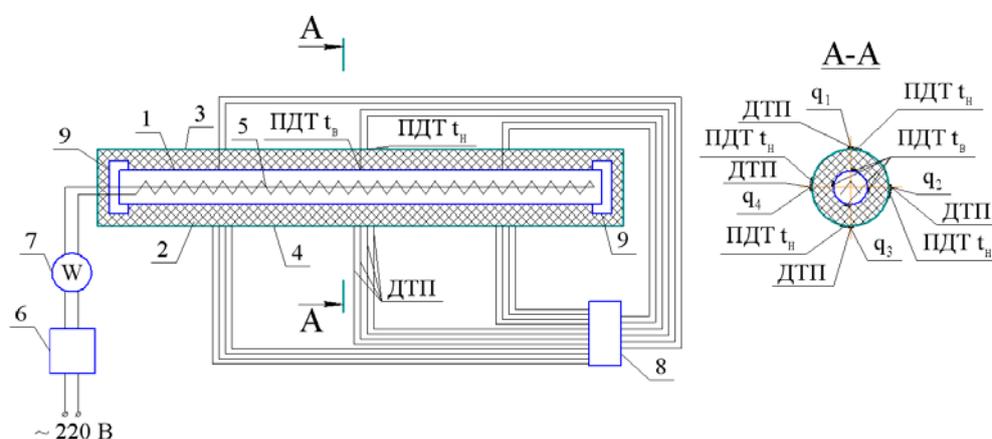


Рис. 2.7. Схема установки по определению плотности теплового потока

Измеритель теплофизических величин «Теплограф» - 8 (рис. 2.8) [140], предназначен для измерения и регистрации тепловых потоков через ограждающие конструкции строительных объектов, промышленного (теплоэнергетического) оборудования, температуры ограждающих конструкций и температуры огражда-

ющих их сред, в том числе с целью количественной оценки эффективности их тепловой защиты.



Рис. 2.8. Измеритель теплофизических величин «Теплограф»

Принцип работы прибора «Теплограф» заключается в преобразовании плотности тепловых потоков в электрический сигнал напряжения с помощью датчиков тепловых потоков (ДТП), преобразовании температуры в сопротивление с помощью платиновых термопреобразователей (датчиков) сопротивления (ПДТ) или непосредственно в цифровой код с помощью цифровых датчиков температуры (ЦДТ), измерении сигналов напряжения и сопротивления и преобразовании их в цифровой код, дальнейшем преобразовании кода в поименованные величины, в соответствии с номинальными статическими характеристиками, хранении и отображении массивов измерительной информации и передачи данных во внешние устройства.

Прибор «Теплограф» состоит из регистратора и подключенных к нему модулей различных модификаций, включающих в себя адаптеры ДТП, ПДТ и ЦДТ. Определение сопротивления теплопередаче и термического сопротивления ограждающих конструкций прибором «Теплограф» проводили в соответствии с рекомендациями [141].

Анализатор качества электроэнергии AR.5 – 7 (рис. 2.9), предназначен для сбора и анализа всех параметров электрической сети, согласно стандарту ГОСТ 13109. Данный прибор применяется при проведении проверок, аудитов трехфазных электросетей переменного тока, в области анализа графиков потребления мощности (активная, реактивная), подборке УКРМ, фиксировании качественных параметров электроэнергии в сети. Прибор замеряет, рассчитывает и фиксирует значения тока и напряжения и гармоники порядка до 49-го, одно-, трехфазных

электросетей. Также применяется при анализе кратковременных возмущений (провалы, перенапряжения, импульсы, низкочастотные модуляции фликер) и регистрации быстрых процессов при запуске электрооборудования.

Прибор сертифицирован и внесён в единый реестр средств измерений РФ, под номером 17900-05.



Рис. 2.9. Анализатор качества электроэнергии AR.5

### 2.2.2 Описание экспериментальных исследований

Используемые приборы позволили поддерживать температуру внутри трубы до 100°C. Регистрация показаний датчиков температуры и теплового потока осуществляли после наступления стационарного режима. Признаком установившегося стационарного температурного режима являлось неизменность показаний значений температур для одних и тех же датчиков при неизменной мощности электрического нагревателя на протяжении 20 минут. Температура окружающей среды на момент проведения экспериментальных исследований составила 20°C.

Достоверность полученных результатов определяли их многократной повторяемостью, а также использованием высокочувствительного измерительного средства «Теплограф».

Показания значений температуры, полученные с помощью датчиков температуры, подтверждали показаниями, полученными при помощи пирометра.

Полученные результаты представлены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Результаты измерений плотности тепловых потоков теплоизоляционной конструкции

| №<br>изм. | Мин. вата + стеклопластик             |                     |                     |                                       |                     |                     |                                       |                     |                     |                                       |                     |                     | Мин. вата + стеклопластик +ТШП        |                     |                     |                                       |                     |                     |                                       |                     |                     |                                       |                     |                     |
|-----------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------|---------------------|
|           | q <sub>1</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С | q <sub>2</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С | q <sub>3</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С | q <sub>4</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С | q <sub>1</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С | q <sub>2</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С | q <sub>3</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С | q <sub>4</sub> ,<br>Вт/м <sup>2</sup> | t <sub>н</sub> , °С | t <sub>в</sub> , °С |
| 1         | 64,13                                 | 55,41               | 95,51               | 55,22                                 | 54,95               | 95,50               | 51,35                                 | 54,24               | 95,66               | 60,34                                 | 54,63               | 95,59               | 50,29                                 | 53,36               | 96,05               | 48,52                                 | 53,45               | 95,98               | 41,25                                 | 52,91               | 96,02               | 48,45                                 | 53,01               | 96,03               |
| 2         | 61,54                                 | 55,63               | 95,82               | 61,46                                 | 54,94               | 95,79               | 59,86                                 | 54,19               | 95,91               | 53,86                                 | 54,67               | 95,67               | 49,22                                 | 54,15               | 96,09               | 52,67                                 | 53,65               | 95,99               | 44,65                                 | 52,95               | 96,03               | 39,58                                 | 52,97               | 96,07               |
| 3         | 63,85                                 | 55,09               | 95,88               | 58,25                                 | 54,95               | 95,77               | 52,73                                 | 54,33               | 95,85               | 69,52                                 | 54,36               | 95,84               | 57,15                                 | 54,18               | 96,03               | 56,15                                 | 53,68               | 96,00               | 49,45                                 | 52,93               | 96,05               | 40,94                                 | 53,87               | 96,01               |
| 4         | 59,65                                 | 55,14               | 95,71               | 67,63                                 | 54,98               | 95,68               | 45,57                                 | 54,44               | 95,82               | 70,85                                 | 54,38               | 95,83               | 55,25                                 | 53,45               | 96,02               | 49,07                                 | 52,87               | 96,01               | 43,21                                 | 52,82               | 96,04               | 48,53                                 | 53,82               | 95,87               |
| 5         | 65,85                                 | 55,16               | 95,74               | 55,16                                 | 54,91               | 95,71               | 54,94                                 | 54,28               | 95,69               | 53,26                                 | 54,37               | 95,80               | 60,27                                 | 54,26               | 96,02               | 42,55                                 | 53,89               | 96,04               | 37,34                                 | 52,94               | 96,01               | 56,42                                 | 53,87               | 95,93               |
| 6         | 68,25                                 | 55,05               | 95,78               | 54,65                                 | 54,97               | 95,81               | 60,11                                 | 54,07               | 95,73               | 64,38                                 | 54,37               | 95,84               | 56,10                                 | 53,83               | 96,00               | 52,10                                 | 53,87               | 96,05               | 43,86                                 | 52,92               | 96,03               | 46,33                                 | 52,96               | 95,96               |
| 7         | 64,36                                 | 55,18               | 95,82               | 60,98                                 | 54,85               | 95,85               | 51,32                                 | 54,16               | 95,78               | 68,92                                 | 54,36               | 95,83               | 46,08                                 | 54,33               | 96,02               | 48,25                                 | 53,68               | 96,02               | 49,13                                 | 52,83               | 96,05               | 43,62                                 | 53,48               | 95,98               |
| 8         | 72,57                                 | 55,27               | 95,85               | 63,87                                 | 54,96               | 95,76               | 47,65                                 | 54,18               | 95,89               | 51,00                                 | 54,40               | 95,86               | 50,02                                 | 53,41               | 96,08               | 47,28                                 | 53,69               | 96,07               | 52,24                                 | 52,91               | 95,97               | 57,27                                 | 52,68               | 96,07               |
| 9         | 63,62                                 | 55,38               | 95,79               | 66,25                                 | 54,81               | 95,84               | 61,88                                 | 54,77               | 95,81               | 65,46                                 | 54,41               | 95,73               | 56,54                                 | 54,38               | 95,87               | 55,15                                 | 52,87               | 96,09               | 41,16                                 | 52,87               | 95,92               | 45,86                                 | 53,41               | 96,01               |
| 10        | 75,42                                 | 55,24               | 95,85               | 58,90                                 | 54,89               | 95,89               | 49,91                                 | 54,29               | 95,84               | 59,94                                 | 54,53               | 95,57               | 63,89                                 | 53,37               | 96,06               | 39,16                                 | 53,83               | 96,08               | 44,25                                 | 52,89               | 96,01               | 46,54                                 | 53,31               | 96,00               |
| 11        | 68,65                                 | 55,23               | 95,75               | 64,35                                 | 54,97               | 95,65               | 59,25                                 | 54,16               | 95,78               | 49,52                                 | 54,35               | 95,76               | 56,86                                 | 54,45               | 95,82               | 43,27                                 | 53,86               | 96,01               | 41,59                                 | 52,87               | 96,03               | 48,63                                 | 53,84               | 96,00               |
| 12        | 60,56                                 | 55,21               | 95,75               | 68,93                                 | 54,98               | 95,85               | 58,01                                 | 54,12               | 95,89               | 67,75                                 | 54,38               | 95,79               | 64,61                                 | 53,72               | 95,77               | 48,13                                 | 52,89               | 96,04               | 40,45                                 | 52,94               | 96,04               | 51,29                                 | 53,76               | 96,03               |
| 13        | 66,28                                 | 55,34               | 95,69               | 63,53                                 | 54,95               | 95,73               | 48,69                                 | 54,23               | 95,76               | 57,38                                 | 54,46               | 95,81               | 59,84                                 | 53,84               | 96,03               | 44,10                                 | 53,92               | 96,02               | 45,68                                 | 52,96               | 96,04               | 41,85                                 | 52,87               | 96,01               |
| 14        | 61,21                                 | 55,37               | 95,59               | 71,49                                 | 54,97               | 95,68               | 53,31                                 | 54,14               | 95,71               | 61,61                                 | 54,48               | 95,64               | 66,58                                 | 54,25               | 96,08               | 58,25                                 | 53,94               | 96,01               | 43,27                                 | 52,97               | 96,06               | 48,57                                 | 53,74               | 96,06               |
| 15        | 65,34                                 | 55,38               | 95,63               | 55,62                                 | 54,9                | 95,51               | 58,98                                 | 54,26               | 95,70               | 55,83                                 | 54,51               | 95,68               | 49,75                                 | 54,46               | 96,04               | 48,12                                 | 52,98               | 95,87               | 48,06                                 | 52,92               | 96,08               | 48,21                                 | 53,63               | 96,02               |
| 16        | 58,42                                 | 55,42               | 95,74               | 62,38                                 | 54,87               | 95,59               | 45,79                                 | 54,13               | 95,78               | 63,49                                 | 54,60               | 95,68               | 57,34                                 | 54,48               | 96,01               | 46,27                                 | 52,96               | 95,94               | 42,00                                 | 52,88               | 96,07               | 50,13                                 | 53,56               | 96,00               |
| 17        | 64,84                                 | 55,43               | 95,65               | 69,08                                 | 54,89               | 95,60               | 53,29                                 | 54,17               | 95,87               | 54,73                                 | 54,63               | 95,75               | 48,01                                 | 53,37               | 96,01               | 55,14                                 | 53,00               | 95,89               | 43,29                                 | 52,87               | 96,05               | 56,37                                 | 53,54               | 96,00               |
| 18        | 59,70                                 | 55,40               | 95,71               | 54,33                                 | 54,96               | 95,64               | 58,56                                 | 54,14               | 95,86               | 52,27                                 | 54,68               | 95,67               | 58,54                                 | 54,28               | 96,02               | 49,09                                 | 53,14               | 95,86               | 49,61                                 | 52,94               | 96,01               | 49,18                                 | 53,65               | 96,05               |
| 19        | 66,81                                 | 55,39               | 95,70               | 52,05                                 | 54,98               | 95,63               | 51,17                                 | 54,18               | 95,89               | 65,04                                 | 54,87               | 95,91               | 68,52                                 | 53,50               | 96,05               | 55,26                                 | 53,21               | 96,02               | 45,82                                 | 52,94               | 96,08               | 55,68                                 | 53,68               | 96,03               |
| 20        | 69,35                                 | 55,31               | 95,59               | 65,01                                 | 55,00               | 95,67               | 48,55                                 | 54,26               | 95,77               | 56,10                                 | 54,73               | 95,87               | 49,82                                 | 53,46               | 96,08               | 46,52                                 | 53,04               | 96,07               | 51,10                                 | 52,97               | 95,96               | 51,10                                 | 53,38               | 96,06               |

### 2.2.3 Результаты и выводы

Анализ полученных результатов исследований по определению плотности тепловых потоков на поверхности изоляции с целью сравнения влияния наличия ТПП в общей конструкции тепловой изоляции показал, что после нанесения ТПП плотность тепловых потоков снизилась на 17%. В частности, среднее значение величины плотности тепловых потоков в случае «минеральная вата + стеклопластик» составила 60,02 Вт/м<sup>2</sup>, при температуре наружной поверхности 55 °С, а при условии, «минеральная вата + стеклопластик + ТПП» составила 49,77 Вт/м<sup>2</sup>, при температуре наружной поверхности 53 °С. Тепловое сопротивление рассматриваемых изоляционных слоев составило в первом случае 0,68 м<sup>2</sup>·°С/Вт, во втором 0,86 м<sup>2</sup>·°С/Вт. В процентном соотношении тепловое сопротивление, после нанесения ТПП на теплоизоляционную конструкцию, увеличилось на 26 %.

### 2.2.4 Оценка погрешности измерений плотности тепловых потоков и температуры

2.2.4.1 Расчет погрешности прямых измерений теплового потока теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 65,02 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\bar{x}-x_1)^2 + (\bar{x}-x_2)^2 + \dots + (\bar{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,97994 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=20$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,093024$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta \tilde{x}_{сл} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 2,05105 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{сл}$  и инструментальной погрешности  $\Delta \tilde{x}_{ои}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{2,05105^2 + 3,9012^2} = 4,40751 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 6,7787 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (65,02 \pm 4,41) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 6,8\%; \alpha = 0,95.$$

2.2.4.2 Расчет погрешности прямых измерений температуры теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 55,30 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2 + (\tilde{x}-x_2)^2 + \dots + (\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,03135 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При количестве измерений  $n=20$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,093024$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n} \tilde{\sigma} = 0,06561 \text{ }^\circ\text{C} \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{0,06561^2 + 0,02^2} = 0,0686 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 0,12404 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (55,30 \pm 0,07) \text{ }^\circ\text{C}; \sigma = 0,12\%; \alpha = 0,95.$$

2.2.4.3 Расчет погрешности прямых измерений теплового потока теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 56,23 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2+(\tilde{x}-x_2)^2+\dots+(\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 1,45273 \text{ Вт/м}^2.$$

При количестве измерений  $n=20$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,093024$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 3,0406 \text{ Вт/м}^2 \text{ с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{3,0406^2 + 3,37404^2} = 4,54196 \text{ Вт/м}^2.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 8,07689 \text{ \%}.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (56,23 \pm 4,54) \text{ Вт/м}^2; \sigma = 8,10\%; \alpha = 0,95.$$

2.2.4.4 Расчет погрешности прямых измерений температуры теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП.

Рассчитали среднее арифметическое значение результатов измерений:

$$\tilde{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = 96,01 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Вычислили среднеквадратичное отклонение:

$$\tilde{\sigma} = \sqrt{\frac{(\tilde{x}-x_1)^2+(\tilde{x}-x_2)^2+\dots+(\tilde{x}-x_n)^2}{n(n-1)}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{x}-x_i)^2}{n(n-1)}} = 0,01934 \text{ }^\circ\text{С}.$$

При количестве измерений  $n=20$ , доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  и коэффициенте Стьюдента  $t_{\alpha n}=2,093024$ , доверительный интервал случайной погрешности составил:

$$\Delta\tilde{x}_{\text{сл}} = t_{\alpha n}\tilde{\sigma} = 0,04048 \text{ }^\circ\text{С с доверительной вероятностью } \alpha=0,95.$$

Определили абсолютную погрешность измерения с учетом случайной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}$  и инструментальной погрешности  $\Delta\tilde{x}_{\text{ои}}$ :

$$\Delta\tilde{x} = \sqrt{\Delta\tilde{x}_{\text{сл}}^2 + \Delta\tilde{x}_{\text{ои}}^2} = \sqrt{0,04048^2 + 0,02^2} = 0,04516 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Вычислили относительную погрешность измерения:

$$\sigma = \frac{\Delta\tilde{x}}{\tilde{x}} \cdot 100\% = 0,04703 \text{ } \%.$$

Окончательные результаты измерения составили:

$$x = (96,01 \pm 0,05) \text{ } ^\circ\text{C}; \sigma = 0,05\%; \alpha = 0,95.$$

2.2.4.5 Расчет погрешности косвенных измерений теплового сопротивления теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и тонкопленочного покрытия в соответствии с методикой [128].

Выполнили оценку погрешности прямых измерений всех непосредственно измеряемых величин, входящих в формулу для искомой величины, с учетом погрешности многократных измерений. При этом для всех измеряемых величин задали одно и то же значение доверительной вероятности  $\alpha=0,95$ .

С помощью средних значений измеряемых величин  $\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_m$  рассчитали значение искомой величины  $\tilde{y} = f(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \tilde{x}_3, \dots, \tilde{x}_m)$ .

Получили выражение для погрешности косвенных измерений по формуле  $\Delta\tilde{y} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{x}_i}\right)^2 \Delta\tilde{x}_i^2}$ .

Окончательный результат представили в виде  $y = \tilde{y} \pm \Delta\tilde{y}$  с доверительной вероятностью  $\alpha$ .

Относительную погрешность искомой величины определили по формуле  $\sigma = \frac{\Delta\tilde{y}}{\tilde{y}} \cdot 100\%$ .

Полученные результаты представлены в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Результаты расчета погрешности косвенных измерений теплового сопротивления с доверительной вероятностью  $\alpha = 0,95$

|   | Мин. вата + стеклопластик |                |                |                | Мин. вата + стеклопластик + ТПП |                |                |                |
|---|---------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|   | R <sub>1</sub>            | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub> | R <sub>1</sub>                  | R <sub>2</sub> | R <sub>3</sub> | R <sub>4</sub> |
| $y = \tilde{y} \pm \Delta\tilde{y}$ ,<br>м <sup>2</sup> ·К/Вт | 0,62±0,04                 | 0,66±0,04      | 0,78±0,05      | 0,69±0,04      | 0,75±0,04                       | 0,86±0,05      | 0,96±0,06      | 0,87±0,05      |
| $\sigma$ , %  | 6,0                       | 6,0            | 6,0            | 6,0            | 6,0                             | 6,0            | 6,0            | 6,0            |

### 2.3 Выводы по главе

Нанесение ТПП на поверхность теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты и стеклопластика, привело к увеличению коэффициента теплопроводности на 1% при 1 слое, 2% при 2 слоях покрытия и 4% при 3 слоях покрытия.

При оценке лучистой составляющей интегральный коэффициент излучения ТПП на поверхности теплоизоляционной конструкции незначительно отличается от величины интегрального коэффициента излучения теплоизоляционной конструкции без ТПП. Среднее значение в обоих случаях составляет 0,88.

По результатам, полученным в процессе эксперимента, наблюдается снижение воздухопроницаемости покровного слоя после нанесения ТПП. Так же с увеличением количества слоев воздухопроницаемость снижается.

Что касается эффективности применения ТПП в конструкции изоляции, после нанесения ТПП плотность тепловых потоков снизилась на 17%. Тепловое сопротивление теплоизоляционной конструкции после нанесения ТПП увеличилось на 26%.

Таким образом, можно констатировать, что наибольшее влияние на повышение эффективности теплоизоляционной конструкции после нанесения ТПП влияет воздухопроницаемость, в частности тепловых процессов, конвективная составляющая теплообмена.

### ГЛАВА 3. Математическое моделирование тепловых процессов в тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения с нанесенным ТПП

Целью математического моделирования - теоретическое обоснование энергосберегающего эффекта от нанесения ТПП на поверхность существующей теплоизоляционной конструкции трубопровода тепловой сети.

#### 3.1 Постановка задачи, физическая картина тепловых процессов

Физическая модель представляет собой участок трубопровода тепловой сети, размещенный в подвальном помещении, в котором окружающей средой является воздух.

Рассматриваемая физическая модель участка трубопровода представлена на рис.3.1.

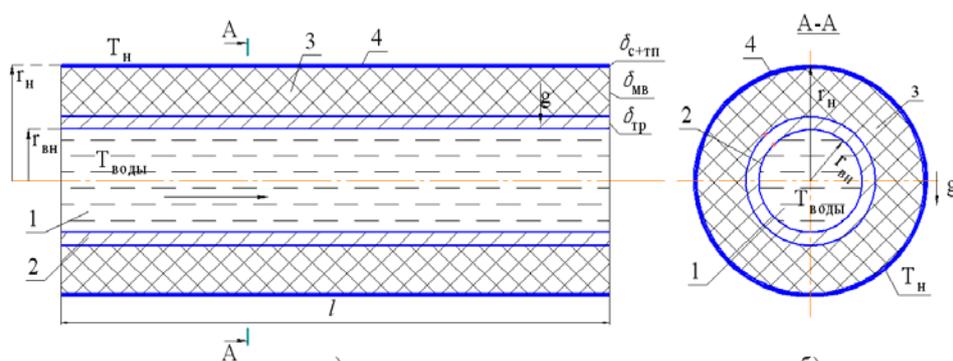


Рис. 3.1. Физическая модель участка трубопровода

Конструкция изолированного трубопровода тепловой сети состоит из нескольких слоев по толщине концентрического расположения, в данном случае состоящих из минеральной ваты (3) в качестве изоляционного слоя и покровного слоя, состоящего из стеклопластика с нанесенным на его поверхность ТПП (4). В качестве теплоносителя принята горячая вода (1). Температура теплоносителя на всем протяжении рассматриваемого модельного участка остается неизменной. Слоем, прилегающим непосредственно к теплоносителю, является стенка стальной трубы (2). Длина модельного участка трубопровода ( $l$ ) выбрана из условия отношения длины к внешнему ее диаметру, равной 20, для обеспечения равномерности теплового потока. Трубопроводы для тепловых сетей выбираются исходя из требований предъявляемых к трубам и материалам по видам и объему контроля в соответствии с «Правилами устройства и безопасной эксплуатации

трубопроводов пара и горячей воды» [26]. Наружный диаметр и толщина стенки трубы выбирается в соответствии с сортаментом по ГОСТ либо ТУ.

На наружную поверхность трубы нанесено антикоррозионное покрытие, а поверх него основной изоляционный слой, толщина которого выбирается исходя из нормативной документации, в зависимости от диаметра и способа прокладки трубопровода.

Теплоизоляционная конструкция представляет собой минеральную вату М-100, в качестве изоляционного слоя, и стеклопластик РСТ-140 с нанесенным на его поверхность ТПП, в качестве покровного слоя. Диаметр трубы модельного участка и конфигурация теплоизоляционной конструкции (толщина, теплопроводность отдельных слоев) также остаются неизменными.

В изолированном трубопроводе, окруженным наружным воздухом, теплота должна пройти через четыре последовательно соединенных сопротивления: внутреннюю поверхность рабочей трубы; стенку трубы; слой изоляции; наружную поверхность изоляции.

Для изучения процессов теплоотдачи строился модельный участок для подающего трубопровода тепловой сети с температурой  $T_{\text{воды}}$ , равной  $100^{\circ}\text{C}$ . Ввиду того, что скорость течения теплоносителя принята  $0,5 \div 3$  м/с, режим течения является устойчивым турбулентным ( $Re > 220000 \div 1300000$ ). Температура окружающей среды  $T_{\text{н}}$  принята равной  $5^{\circ}\text{C}$ , что в среднем соответствует температуре воздуха в подвалах и технических подпольях. Поскольку, режим работы тепловых сетей является стационарным, тепловой пограничный слой является установившимся, стабилизация температуры вдоль потока приводит к стабилизации местной теплоотдачи на рассматриваемой длине модельного участка и средней теплоотдачи на рассматриваемой длине.

Длина рассматриваемой модели участка трубопровода тепловой сети значительно больше по сравнению с его толщиной стенки, в этом случае потерями теплоты с торцов трубы пренебрегаем. При установившемся стационарном тепловом режиме количество теплоты, которое передается от теплоносителя к поверхности стенки трубы, проходит через стенку и отдается от стенки трубопровода к тепло-

вой изоляции. При этом выполняются следующие условия - стенка стальной трубы имеет постоянный коэффициент теплопроводности, температуры теплоносителя и температура прилегающей поверхности тепловой изоляции постоянны, и коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности трубы также постоянен. Передача тепловой энергии через стальную стенку трубы основана на законе Фурье и осуществляется посредством кондуктивной теплопроводности.

Процесс переноса теплоты в рассматриваемой теплоизоляционной конструкции трубопровода основан на законе Фурье – за счет молекулярного переноса тепла посредством теплопроводности, законе Дарси – за счет молярного переноса посредством фильтрации и законе Фика – за счет молекулярного переноса посредством диффузии [21].

Основным слоем теплоизоляционной конструкции является минеральная вата, представляющая собой пористую структуру. Передача тепла в минеральной вате является сложным процессом, включающим перенос теплоты кондуктивной теплопроводностью, излучением и конвекцией, и осуществляется посредством:

- теплопроводности скелета, образующего пористую структуру материала;
- теплопроводности газа, находящегося в порах и капиллярах;
- конвективного переноса теплоты за счет конвективных токов газа в пористой структуре тепловой изоляции [21].

Стеклопластик рулонный теплозащитный РСТ 140 представляет собой пористую структуру и является воздухопроницаемым. Как представлено ранее в эксперименте по оценке воздухопроницаемости, после нанесения ТПП на поверхность стеклопластика количество пор сокращается. Уменьшение числа пор напрямую зависит от количества нанесенных слоев ТПП на поверхность стеклопластика. Ввиду этого геометрия пористой среды такого покровного слоя приобретает случайный характер распределения в ней пор, а передача тепла осуществляется сложным переносом и по тем же законам, как и в основном слое изоляции – теплопроводности скелета, теплопроводности газа и конвективного переноса теплоты за счет конвективных токов газа.

В рассматриваемой модели, окружающей средой является воздух, омывающий поверхность теплоизоляционной конструкции. Процесс теплоотдачи от поверхности теплоизоляционной конструкции и характер ее обтекания находятся в тесной взаимосвязи [110-121]. Характер обтекания довольно сложен и зависит от числа  $Re$  и степени турбулентности потока. Оценка гидродинамической картины обтекания поверхности теплоизоляционной конструкции модельного участка трубопровода, проводилась в соответствии с учетом взаимодействия теплоизоляционной конструкции с окружающей средой. В частности, определен средний коэффициент теплоотдачи при поперечном обтекании трубопровода потоком воздуха и его влияние на распределение давления по поверхности изоляции трубопровода.

Картина моделирования носит стационарный установившийся характер, поскольку режим работы тепловых сетей носит продолжительный характер на протяжении всего отопительного периода, а переходный режим составляет незначительное время в периоды пуска и останова системы теплоснабжения.

При квазиустановившемся тепловом состоянии количество теплоты, протекающей от теплоносителя к концентрической цилиндрической поверхности тепловой изоляции, проходящее через любую точку поля, равно количеству теплоты, уходящей от этой концентрической поверхности к наружной среде.

### **3.2 Постановка задачи математического моделирования**

Решение нестационарной задачи теплопереноса для рассматриваемой модели не является целесообразным, поскольку нестационарные режимы работы трубопроводов тепловых сетей наблюдаются только при вводе их в эксплуатацию после плановых и внеплановых остановов и не являются характерными режимами работы.

Теплоизоляционная конструкция трубопровода представляет собой кольцевую прослойку пористого материала, которая образована двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами. Пористый материал состоит из двух слоев – минеральная вата и покровный слой из стеклопластика с нанесенным ТПП с различной проницаемостью, теплопроводностью и толщиной слоев.

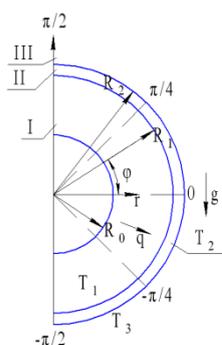


Рис. 3.2 Двухмерная модель теплоизоляционной конструкции трубопровода

Согласно физической трехмерной модели трубопровода (рис. 3.1) теплообмен протекает идентично по длине в радиальном направлении, и основное изменение теплового потока происходит в плоскости поперечного сечения, поэтому моделирование теплообмена можно проводить в двухмерных координатах.

Ввиду наличия симметрии относительно вертикальной оси, проходящей через центр кольцевой прослойки [122], представляющей теплоизоляционную конструкцию трубопровода (рис. 3.2), математическую модель можно представить для половины кольцевой области.

Модель описывает пористую среду между двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами и состоит из следующих зон:

I – представляющей собой основной изоляционный слой, имеющий пористый характер и состоящий из минеральной ваты, где  $R_0$  - внутренний радиус основного изоляционного слоя, соответствующий наружному диаметру наружной стенки стальной трубы,  $R_1$  - внешний радиус основного изоляционного слоя, с проницаемостью  $Kp_1$ , теплопроводностью  $\lambda_1$  и толщиной слоя  $\Delta R_1 = R_1 - R_0$ ;

II - покровный слой, состоящий из стеклопластика и нанесенного на его поверхность ТПП, где  $R_2$  - наружный радиус теплоизоляционной конструкции, с проницаемостью  $Kp_2$ , теплопроводностью  $\lambda_2$  и толщиной слоя  $\Delta R_2 = R_2 - R_1$ ;

III - окружающая среда воздух, где  $T_3$  – средняя температура окружающего воздуха,  $\alpha_3$  – коэффициент теплоотдачи между поверхностью с ТПП и окружающим воздухом.

Для математического описания процесса теплообмена в пористой конструкции изоляции трубопровода тепловых сетей использованы следующие физические условия и допущения.

Ввиду того, что течение теплоносителя в трубопроводе является турбулентным, сопротивление теплоотдаче от теплоносителя к стенке трубы незначительно, то температуру внутренней поверхности трубы считаем равной температуре движущегося теплоносителя  $T_0$ . Так как термическим сопротивлением металлической стенки трубопровода можно пренебречь, температуру внутренней поверхности основного изоляционного слоя, состоящего из минеральной ваты, принимаем равной температуре наружной поверхности трубы, равной температуре движущегося теплоносителя  $T_0$ .

Приняты следующие физические допущения:

- на внутренней поверхности основного изоляционного слоя поддерживается постоянная температура, равная  $T_0$ , температура внешней окружающей среды поддерживается постоянной и равномерной  $T_3$ , при этом  $T_0 > T_3$ ;

- в стационарных условиях при неизменном удельном тепловом потоке температуры на границе между основным изоляционным слоем и покровным слоем имеют одинаковую величину в стационарном состоянии, при этом выполняется условие  $T_1 = T_2 = \text{const}$ ;

- пористая среда рассматривается как непрерывная (сплошная), гомогенная, изотропная, в которой твердая и жидкие фазы находятся в термодинамическом равновесии и насыщена несжимаемой Ньютоновской жидкостью (воздухом);

- термофизические свойства жидкости (воздуха), за исключением плотности, рассчитываются при средней температуре среды  $(T_0 + T_3)/2$ , плотность определяется с помощью коэффициента объемного теплового расширения  $\beta$ , при расчете подъемной силы приближением Буссинеска;

- пористость и проницаемость материала принимаем постоянной по всей рассматриваемой площади;

- течение жидкости (воздуха) в пористой среде принимаем ламинарное, подчиняющееся закону Дарси.

Для расчета поля течения и переноса тепла в стационарных условиях применили уравнение конвекции в приближении Буссинеска, где поверхностная сила

была заменена эквивалентной объемной силой сопротивления в соответствии с законом Дарси [122].

$$\mu \bar{v}/k = -\nabla p + \rho g \beta \Delta T, \quad (3.1)$$

$$\operatorname{div} v = 0, \quad (3.2)$$

$$\sigma(\bar{v}\nabla)T = \lambda^* \nabla^2 T, \quad (3.3)$$

где  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;  $\bar{v}$  – скорость;  $k$  – коэффициент проницаемости пористой среды;  $p$  – отклонение давления от статистического;  $\rho$  – плотность;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $\Delta T = T - T^*$  – разность между местной и некоторой опорной температурой;  $T^*$  – опорная температура;  $\lambda^*$  – эффективный коэффициент теплопроводности тепло-вой изоляции;  $\sigma$  – коэффициент теплоемкости [165].

$$\sigma = \varepsilon \rho \cdot c_p, \quad (3.4)$$

где  $c_p$  – удельная теплоемкость воздуха, заполняющего поры;  $\varepsilon$  – пористость.

При наличии симметрии относительно вертикальной оси граничные условия для угла  $\varphi = \pm \pi/2$  имеют вид

$$R_0 < r < R_2, \nabla t = 0, \nabla p = 0, \quad (3.5)$$

Таким образом, граничные условия для угла  $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$  примут вид

$$R_0 < R_1, R_0 \leq r \leq R_1, \quad (3.6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1, \lambda^* = \lambda^*_1, \rho = \rho_1, K = Kp_1, c_p = c_{p1}, \quad (3.7)$$

$$R_1 < R_2, R_1 \leq r \leq R_2, \quad (3.8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_2, \lambda^* = \lambda^*_2, \rho = \rho_2, K = Kp_2, c_p = c_{p2}, \quad (3.9)$$

$$r = R_0: \nabla p = 0, t = T_0, \quad (3.10)$$

$$r = R_2: p_2 = \rho g(2R_1 - y), \nabla t = \frac{\alpha_3}{\lambda_2^*} (T_2 - T_3), \quad (3.11)$$

Поскольку толщина покровного слоя много меньше толщины минеральной ваты  $\delta_2 \ll \delta_1$ , то при моделировании двухслойной конструкции можно заменить второй слой эквивалентным термическим и гидравлическим сопротивлением:

$$r = R_2: \nabla t = \frac{1}{\lambda_1^*} \frac{T_1 - T_3}{\frac{\delta_2}{\lambda_2^*} + \frac{1}{\alpha_3}}, \quad (3.12)$$

Так как  $\delta_2 \approx 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ,  $\lambda_2^* \approx 0,6 \text{ Вт/(мК)}$  и  $\alpha \approx 10^0 \div 10^2$ , при этом  $\frac{\delta_2}{\lambda_2^*} \ll \frac{1}{\alpha_3}$ , тогда уравнение (3.12) можно записать в следующем виде

$$\nabla t = \frac{\alpha_3}{\lambda_1^*} (T_1 - T_3), \quad (3.13)$$

$$\nabla p = \frac{Kp_2}{Kp_1 \delta_2} (P_1 - P_3), \quad (3.14)$$

$$P_3 = \rho g(2R_1 - y) + \bar{P}_4, \quad (3.15)$$

где  $\alpha_3$  - коэффициент теплоотдачи, при вынужденном движении воздуха определяется по формулам (1.14-1.15), при свободном движении по формуле (1.16);  $\bar{P}_4$  – задается по графику распределения давления.

### 3.3 Методика численного моделирования

#### 3.3.1 Параметры численного моделирования

##### 3.3.1.1 Параметры трубопровода

Численным моделированием рассмотрены основные типоразмеры трубопроводов, наиболее часто применяемых в системах теплоснабжения, табл. 3.1. Наружный диаметр и толщина стенки трубы выбирается в соответствии с сортаментом по [142]

Таблица 3.1

| № | Наружный диаметр трубопровода, мм | Толщина изоляции, мм |
|---|-----------------------------------|----------------------|
| 1 | 57                                | 60                   |
| 2 | 108                               | 60                   |
| 3 | 159                               | 60                   |
| 4 | 325                               | 80                   |
| 5 | 530                               | 80                   |

##### 3.3.1.2 Параметры основного слоя изоляции трубопровода

В качестве теплоизоляционного слоя принята минеральная вата, толщина слоя изоляции принята в соответствии с нормами, принятыми в теплосетевых компаниях [56] (табл. 3.3.1).

Характеристики основного изоляционного слоя, состоящего из минеральной ваты М-100, принимаемые для численного моделирования:

- средняя плотность - 100 кг/м<sup>3</sup>,
- средний коэффициент проницаемости -  $1,0 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>, по аналогии с работой [138],
- коэффициент теплопроводности - 0,045 Вт/(м·°С).

При эксплуатации трубопроводов тепловых сетей происходит нарушение целостности теплоизоляционного слоя, что приводит к ухудшению теплозащитных свойств изоляции, таким как усадка, разрыхление, обвисание, увеличению

плотности, снижение прочности и т.д. [75]. Поскольку протяженность теплотрассы имеет большое значение, а характер разрушений основного изоляционного слоя на всей протяженности неоднороден, то для численного моделирования рассмотрим эквивалентную однородную минеральную вату со средней проницаемостью  $K_{p1}$ .

Для оценки эффективности применения ГПП в вышеприведенных условиях зададимся рядом значений проницаемости  $K_{p1}=[1,0 \cdot 10^{-7}; 1,0 \cdot 10^{-11}]$ .  $K_{p1}=1 \cdot 10^{-11}$  характеризует условия новой изоляции, а при  $K_{p1}=1 \cdot 10^{-7}$  рассмотрен наихудший вариант разрушений.

Плотность и пористость основного изоляционного слоя в процессе эксплуатации ввиду разрушений меняются. При условиях, когда основной изоляционный слой в новом состоянии, пористость  $\varepsilon \approx 0,96$ , а в результате ухудшения его свойств, пористость увеличивается и  $\varepsilon \rightarrow 1$ .

При численном решении задачи в стационарных условиях (3.1-3.3) плотность минеральной ваты ( $\rho_1$ ) не учитывается, а основную роль играет пористость ( $\varepsilon$ ), в соответствии с уравнением  $\sigma = \varepsilon \rho \cdot c_p$ . При ухудшении состояния минеральной ваты  $\varepsilon \rightarrow 1$ ,  $\sigma \rightarrow \rho c_p$ , тогда в этих условиях можно принять  $\sigma \approx \text{const}$ .

В работе [143] приведены результаты контроля теплопроводности однослойных теплоизоляционных плит из каменной ваты и стекловолокна при различных значениях плотности (рис. 3.3).

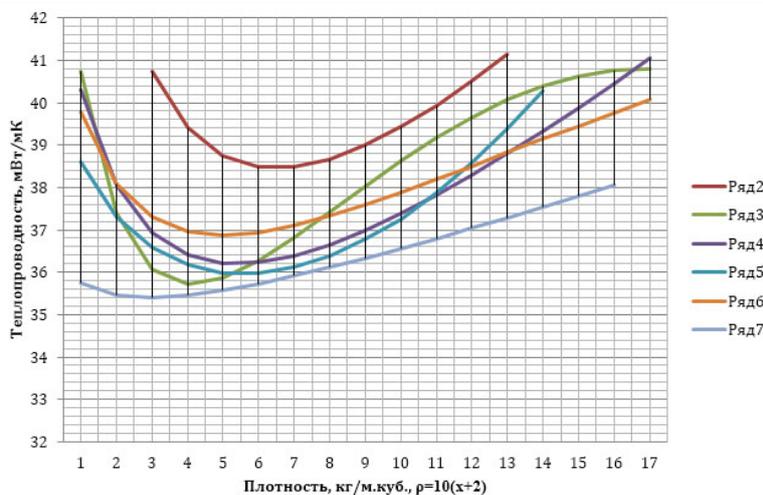


Рис. 3.3. Зависимость  $\lambda_{25}=f(\rho)$  плит теплоизоляционных из каменной ваты: Ряд 2 – ГОСТ 9573, Ряд 3 – Роквул, Ряд 4 – Извол, Ряд 5 – Изорок, Ряд 6 – Технониколь, Ряд 7 – СНиП.

Из рис. 3.3 видно, что влияние изменения плотности минеральной ваты на коэффициент теплопроводности носит незначительный характер и поэтому для

моделирования была принята средняя величина коэффициента теплопроводности  $0,045 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ .

### 3.3.1.3 Параметры покровного слоя изоляции

Выбор покровного слоя тепловой изоляции осуществляется в соответствии с местом размещения трубопроводов - в помещении (техническое подполье, подвал и т.д.) либо на открытом воздухе. В частности, подбор стеклопластика рулонного РСТ зависит от его плотности, которая в свою очередь влияет на воздухопроницаемость покровного слоя. Однако, в процессе эксплуатации эффективность покрытия снижается. Под воздействием влияния внешних факторов, таких как солнце, ветер и влага, происходит разрушение. В частности, при солнечном воздействии стеклопластик становится хрупким, а воздействие ветровых нагрузок и влаги впоследствии ведет к появлению трещин и смыванию полимерных связующих (карбамидоформальдегидные, фенолоформальдегидные, кремнийорганические, ненасыщенные полиэфирные латексы различных марок и другие модификации), что приводит к разрывам и увеличению проницаемости покровного слоя ( $K_{p2}$ ). Поэтому для такого рода ситуаций нанесение ТПП играет важную роль, поскольку позволяет восстановить свойства покровного слоя и ведет к снижению его проницаемости.

Характеристики покровного слоя, состоящего из стеклопластика рулонного РСТ 140 с нанесенным ТПП, приведены в табл. 3.2:

Таблица 3.2

| Вид покровного слоя           | Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ | Теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{С})$ | Коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{С})$ | Воздухопроницаемость, $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{ч}\cdot\text{Па}$ | Коэффициент проницаемости, $\text{м}^2$ |
|-------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|
| Разрушенный покровный слой    | 828,14                            | 1107,67  | $152,56\cdot 10^{-3}$   | $6,00\cdot 10^{-2}$   | $1,00\cdot 10^{-10}$                    |
| Покровный слой без ТПП        | 828,14                            | 1107,67  | $152,56\cdot 10^{-3}$   | $2,00\cdot 10^{-3}$   | $3,00\cdot 10^{-11}$                    |
| Покровный слой с ТПП (1 слой) | 976,35                            | 1097,23  | $153,36\cdot 10^{-3}$   | $1,24\cdot 10^{-3}$   | $5,40\cdot 10^{-12}$                    |
| Покровный слой с ТПП (2 слоя) | 1058,20                           | 1088,27  | $154,05\cdot 10^{-3}$   | $5,24\cdot 10^{-5}$   | $2,30\cdot 10^{-13}$                    |
| Покровный слой с ТПП (3 слоя) | 1111,11                           | 1080,53  | $154,64\cdot 10^{-3}$   | $4,17\cdot 10^{-5}$   | $1,80\cdot 10^{-13}$                    |

При  $K_{p2}=3,0\cdot 10^{-11}$  выполняется условие, соответствующее целостному покровному слою, т.е. стеклопластик в исходном новом состоянии. При условии  $K_{p2}=1,0\cdot 10^{-10}$  характерно нарушение покровного слоя и имеются трещины.

### 3.3.1.4 Гидродинамические характеристики внешнего обтекания

Работа трубопроводов осуществляется в условиях конвекции. Причем при размещении трубопроводов в технических подпольях, подвалах, камерах и павильонах наблюдается естественная конвекция. При размещении трубопроводов на открытом воздухе при воздействии ветровой нагрузки теплообмен с окружающей средой осуществляется в результате вынужденной конвекции.

С целью изучения энергосберегающих свойств ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов исследованы два наиболее распространенных способа прокладки тепловых сетей - на открытом воздухе и в помещении (техническое подполье, подвал и т.д.).

В подвальном помещении или техническом подполье трубопроводы находятся в условиях естественной конвекции (рис. 3.4).

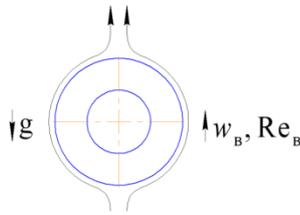


Рис. 3.4. Обтекание трубопровода в условиях естественной конвекции

При этом принято, что температура воздуха в подвале принята  $5^{\circ}\text{C}$  [144], температура внутренней стенки трубопровода принята равной температуре теплоносителя  $100^{\circ}\text{C}$ , температура наружной поверхности изоляции  $40^{\circ}\text{C}$  [59]. Критерии Рэлея -  $Ra$ , Рейнольдса -  $Re$  и Нуссельта -  $Nu$ , а также коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  при поперечном обтекании трубопровода рассчитаны по следующим формулам [166-172]

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad (3.20)$$

$$Nu = C \cdot Ra^n, \quad (3.21)$$

$$Re = \left( \frac{Nu}{0,245} \right)^{1/0,6}, \quad (3.22)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}, \quad (3.23)$$

Результаты расчетов представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

| № | Наружный диаметр трубопровода, мм | Толщина изоляции, мм | Критерий $Ra$     | Критерий $Re$ | Критерий $Nu$     | Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/( $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ) |
|---|-----------------------------------|----------------------|-------------------|---------------|-------------------|---|
| 1 | 57                                | 60                   | $2,05 \cdot 10^7$ | 4267          | $0,37 \cdot 10^2$ | 5,21  |

|   |     |    |                   |       |                   |      |
|---|-----|----|-------------------|-------|-------------------|------|
| 2 | 108 | 60 | $4,37 \cdot 10^7$ | 6507  | $0,48 \cdot 10^2$ | 5,21 |
| 3 | 159 | 60 | $8,01 \cdot 10^7$ | 9110  | $0,58 \cdot 10^2$ | 5,21 |
| 4 | 325 | 80 | $4,21 \cdot 10^8$ | 22896 | $1,01 \cdot 10^2$ | 5,21 |
| 5 | 530 | 80 | $1,21 \cdot 10^9$ | 41204 | $1,44 \cdot 10^2$ | 5,21 |

Трубопроводы, расположенные на открытом воздухе, находятся в условиях вынужденной конвекции при боковом обтекании воздуха (рис. 3.5).

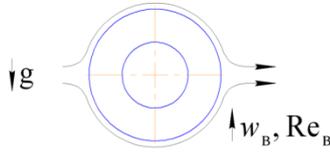


Рис. 3.5. Обтекание трубопровода в условиях вынужденной конвекции

При этом приняты следующие параметры: скорость воздуха 5,7 м/с, что соответствует среднегодовому значению скорости ветра Казани, а температура окружающего воздуха  $-5,2$  °С в соответствии с [145].

Результаты расчета критерия Re представлены в табл. 3.4

Таблица 3.4

| № | Наружный диаметр трубопровода, мм | Толщина изоляции, мм | Критерий Re | Критерий Nu       | Коэффициент теплоотдачи $\alpha$ , Вт/(м <sup>2</sup> ·К) |
|---|-----------------------------------|----------------------|-------------|-------------------|---|
| 1 | 57                                | 60                   | 63100       | $1,86 \cdot 10^2$ | 26,24   |
| 2 | 108                               | 60                   | 81200       | $2,16 \cdot 10^2$ | 23,71   |
| 3 | 159                               | 60                   | 99400       | $2,44 \cdot 10^2$ | 21,87   |
| 4 | 325                               | 80                   | 173000      | $3,40 \cdot 10^2$ | 17,53   |
| 5 | 530                               | 80                   | 246000      | $4,20 \cdot 10^2$ | 15,23   |

Характер изменения распределения давления на внешней поверхности изоляции трубопровода тепловой сети задается в соответствии с графиками распределения давления на поверхности цилиндра при различных режимах обтекания с учетом значений Re (см. рис. 1.6).

### 3.3.1.5 Оценка эффективности применения ТПП

Оценка эффективности применения ТПП на поверхности теплоизоляционной конструкции определяется по следующей формуле

$$\delta q = \frac{q}{q_0}, \quad (3.24)$$

где  $q = q_{cp} = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} q d\varphi$  средний тепловой поток с поверхности изоляции трубопровода;

$q_0 = q_{0\text{ср}} = \frac{1}{\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} q_0 d\varphi$  средний тепловой поток с поверхности новой изоляции трубопровода при соответствии условиям проницаемости основного слоя изоляции  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$  и покровного слоя  $K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11}$ .

### 3.3.2. Реализация численного метода моделирования

Для решения системы дифференциальных уравнений численным методом в частных производных, используем метод конечных элементов [146-148] с применением программного пакета *FlexPDE* [149,150]. В этом методе исходная дифференциальная задача заменяется конечной дискретной моделью. Приближенное решение в методе конечных элементов ищется в виде разложения по базису из кусочно-линейных функций, каждая из которых отлична от нуля лишь в некоторой достаточной области. Для определения коэффициентов разложения получают системы линейных алгебраических уравнений с большими разреженными матрицами специального вида. Эти системы уравнений представляют собой разностные схемы, аппроксимирующие исходную задачу.

Обобщенная схема расчета по методу конечных элементов заключается в следующих основных этапах – определение области решения, разбиение на конечные элементы, вычисление коэффициентов алгебраической системы, решение уравнений и вывод результатов.

Анализ методом конечных элементов начинается с дискретизации исследуемой задачи и деления ее на ячейки сетки, называемые конечными элементами, взаимосвязанные в узловых точках (рис. 3.6).

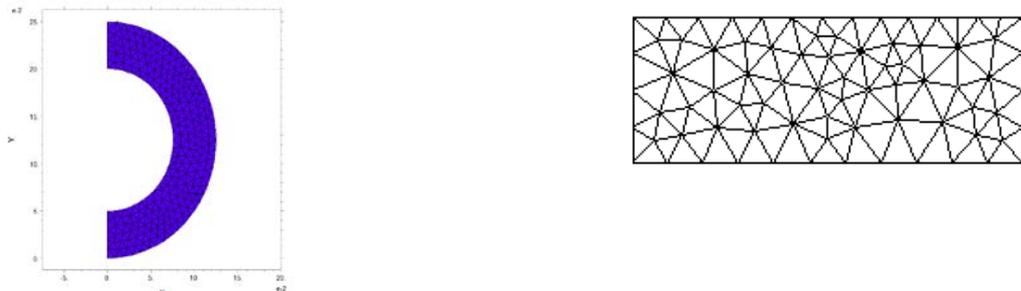


Рис. 3.6. Пример двумерной конечно-элементной сетки расчетной области модели

При этом границы внешних элементов аппроксимируют в совокупности границу области в целом, осуществляется решение системы уравнений для узловых значений, расчет любой другой функции, зависящей от узловых неизвестных.

Преимущество применения метода конечных элементов в решении задач теории поля заключается в следующем: свойства материала каждого элемента могут быть индивидуальными и к тому же анизотропными; обеспечивается широкая вариация задания граничных условий на отдельных границах области; криволинейные границы области могут быть аппроксимированы с помощью прямолинейных элементов; размеры элементов могут быть переменными, как и форма самих элементов; обеспечивается возможность повышения решения точности задач путем увеличения количества элементов, ограничиваемого лишь мощностью используемого компьютера; вследствие наличия общих узловых точек, глобальные матрицы являются ленточными, т.е. содержат большое количество нулей, незанятых в память компьютера [146].

*FlexPDE* – программа, предназначенная для построения с помощью заданного пользователем сценария систем дифференциальных уравнений и их решения методом конечных элементов. Программа производит все необходимые операции для преобразования описания системы дифференциальных уравнений в модель для расчета методом конечных элементов, находит решение для этой системы и представляет результаты в графической форме. Таким образом, *FlexPDE* выполняет роль вычислительной среды для решения задач, поскольку в этой программе заключен полный набор функций, необходимых для решения системы дифференциальных уравнений в частных производных:

- функции редактирования для подготовки сценариев;
- генератор сеток конечных элементов;
- функции подбора конечных элементов при поиске решения;
- графические функции представления результатов решения.

*FlexPDE* не ограничивает пользователя заранее заданным списком прикладных задач или видов уравнений. Выбор вида дифференциальных уравнений в частных производных полностью зависит от пользователя. Язык сценария позво-

ляет пользователю описывать математический аппарат его системы дифференциальных уравнений в частных производных и структуру области решений в целом в естественном формате. Эта форма сценария имеет много преимуществ:

- сценарий полностью описывает систему уравнений и рассматриваемую область решения;
- новые переменные, новые уравнения или новые условия могут легко добавляться в сценарий по желанию.

Для решения полученных сеточных уравнений, с применением метода конечных элементов, используются различные методы, такие как Якоби, Зейделя, верхней релаксации, явный итерационный, попеременно-треугольный итерационный, итерационный переменных направлений, Ньютона-Рафсона, матричной прогонки и т.д. В примененном пакете *FlexPDE* используется метод Ньютона-Рафсона.

Расчет полной математической модели тепловых процессов в тепловой изоляции тепловых сетей с нанесенным тонкопленочным покрытием в программе *FlexPDE* реализуется по сценарию, приведенному в Приложении 2.

### **3.4 Результаты численного моделирования**

Целью численного моделирования является изучение процессов теплообмена в пористой тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей в зависимости от состояния теплоизоляционных материалов и условий размещения трубопроводов.

Результаты расчета полной математической модели в программе *FlexPDE* тепловых процессов и скоростей в тепловой изоляции тепловых сетей с нанесенным ТПП для рассмотренных основных типоразмеров трубопроводов, представлены в Приложениях 3.1 и 3.2.

Для оценки адекватности моделирования (верификации) полученные результаты полей температур и скоростей сравнивались с данными, представленными в работах [122-125], их сопоставление показало хорошую сходимость.

Результаты оценки эффективности применения ТПП на поверхности теплоизоляционной конструкции, полученные путем математического моделирования, хорошо коррелируют с результатами экспериментальных данных [см. Глава 2].

### **3.4.1 Обтекание в условиях естественной конвекции в помещении (техническом подполье, подвале и т.д.)**

#### **3.4.1.1 Распределение полей температур и скоростей в условиях естественной конвекции в помещении (техническом подполье, подвале и т.д.)**

Рассмотренные модели трубопроводов с теплоизоляционными конструкциями наглядно показывают изменение температурного поля в толще теплоизоляционной конструкции.

Влияние имеет состояние основного изоляционного слоя, так при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  наблюдается явное изменение температурного поля в толще теплоизоляционной конструкции, по сравнению с условиями  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ . Это характерно для всех рассмотренных диаметров (Приложение 3.2).

Во всех рассмотренных случаях можно отметить, что наибольшее влияние на величину плотности тепловых потоков оказывает состояние покровного слоя теплоизоляционной конструкции. Так как даже при разрушенном основном изоляционном слое, при наличии покровного слоя с низким коэффициентом проницаемости эффективность тепловой изоляции стремится к показателям, близким к состоянию, соответствующему новой изоляции.

При условии одинакового состояния основного изоляционного слоя ( $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ ) влияние состояния покровного слоя ( $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  (рис. 3.7)) на поле температур носит незначительный характер, однако после нанесения ТПП в один слой ( $K_{p2}=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ), температурное поле изменяется, а нанесение второго слоя позволяет улучшить состояние до нормальных условий ( $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  (рис.3.8)).

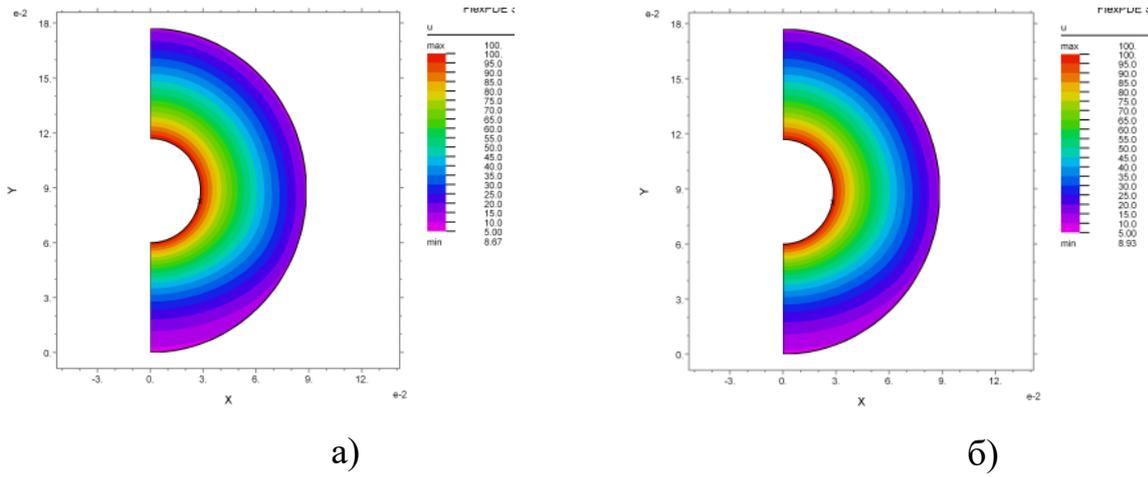


Рис. 3.7. Изменение температурного поля в теплоизоляционной конструкции при естественной конвекции: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$

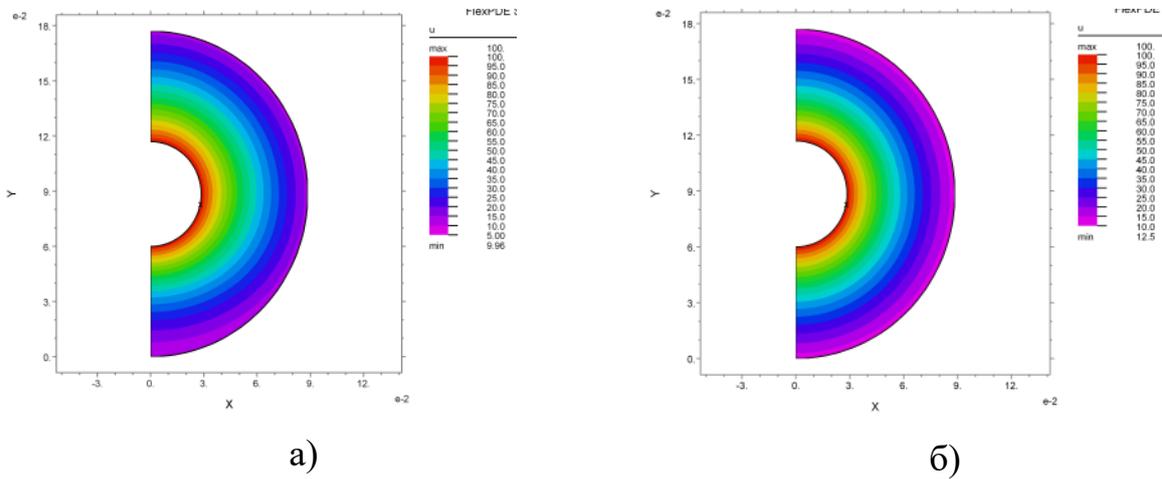


Рис. 3.8. Изменение температурного поля в теплоизоляционной конструкции при естественной конвекции: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ .

При условии состояния основного изоляционного слоя  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ , наблюдается значительное изменение полей температур. Однако их распределение при разрушенном покровном слое  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$  и покровном слое без ТПП  $K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  практически одинаковы (рис. 3.9). После нанесения на поверхность ТПП в один слой характер изменения становится более заметным, а двухслойное покрытие (рис. 3.10) соответствует условиям новой изоляции ( $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  (рис. 3.8.б)).

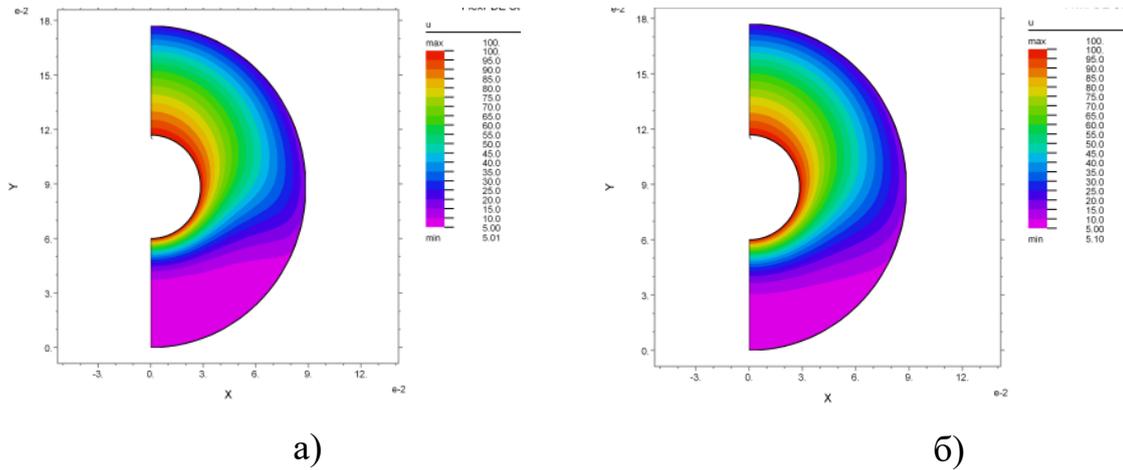


Рис. 3.9. Изменение температурного поля в теплоизоляционной конструкции при естественной конвекции: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ .

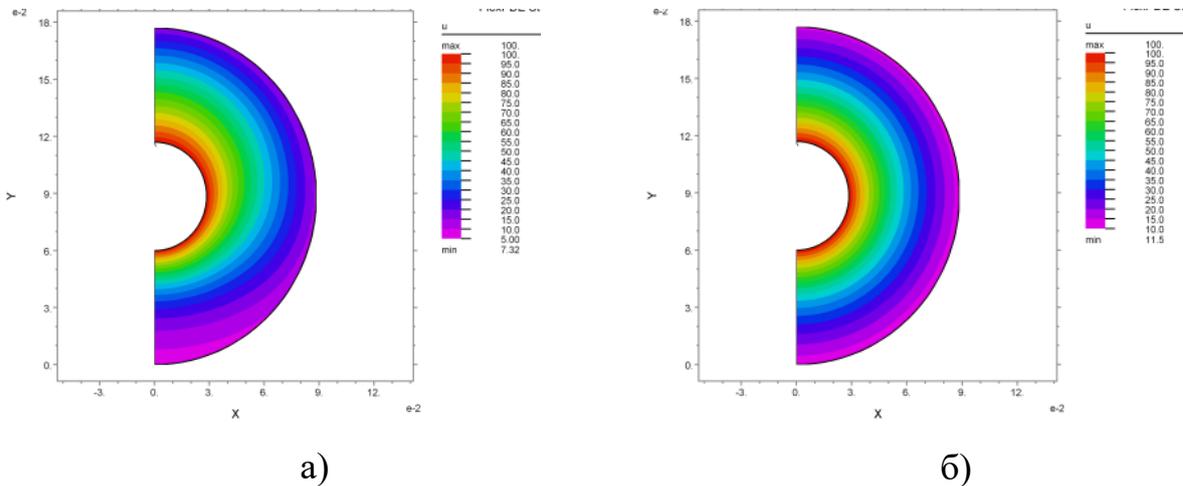


Рис. 3.10. Изменение температурного поля в теплоизоляционной конструкции при естественной конвекции: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=5,4 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ .

Также стоит отметить распределение полей скоростей. Для условия  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  характерны большие значения скоростей по сравнению с  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  (Приложение 3.2).

При условии  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$  нанесение ТПП в один слой ( $K_{p2}=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ) приводит к уменьшению скоростей в диапазоне от  $0,44 \cdot 10^{-4}$  до  $9,39 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$ , а после нанесения второго слоя ( $K_{p2}=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ ) картина распределения полей скоростей полностью меняется и составляет  $0,18 \cdot 10^{-4}$  до  $2,9 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}$  (рис. 3.11).

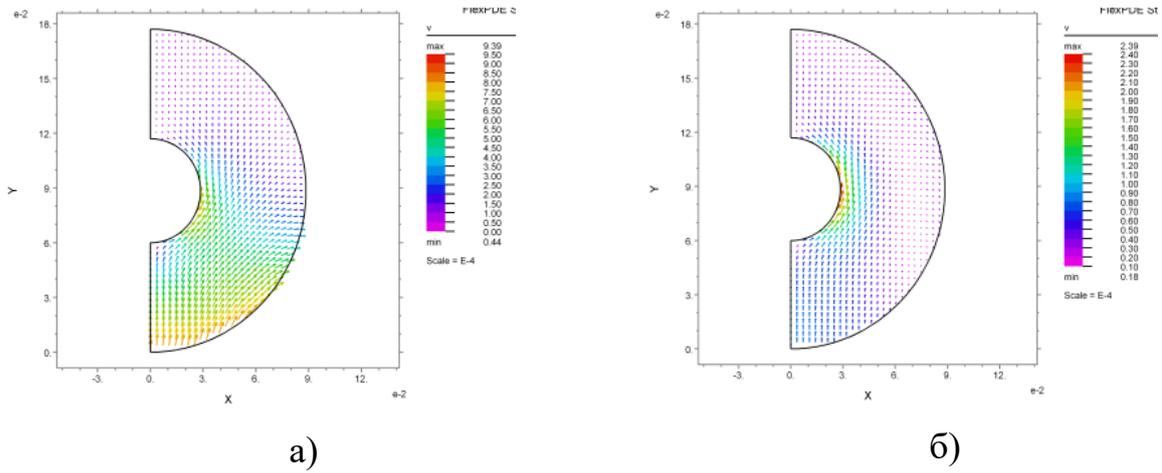


Рис. 3.11. Изменение скоростей в теплоизоляционной конструкции при естественной конвекции: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ .

При условии состояния основного изоляционного слоя  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и разрушенного покровного слоя  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$  происходит интенсивное распределение (изменение) скоростей от  $0,04 \cdot 10^{-2}$  до  $1,16 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$  (рис. 3.22.а). В условиях характерных для  $K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  величины скоростей снижаются до диапазона от  $0,40 \cdot 10^{-3}$  до  $7,11 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  (рис. 3.12.б), а при нанесении ТПП в один слой эти величины уменьшаются в 2 раза и составляют от  $0,25 \cdot 10^{-3}$  до  $3,32 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$  (рис. 3.13.а). Двухслойное же покрытие приводит не только к снижению скоростей в диапазоне от  $0,04 \cdot 10^{-3}$  до  $1,57 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ , но и к изменению характера распределения полей скоростей (рис. 3.13.б).

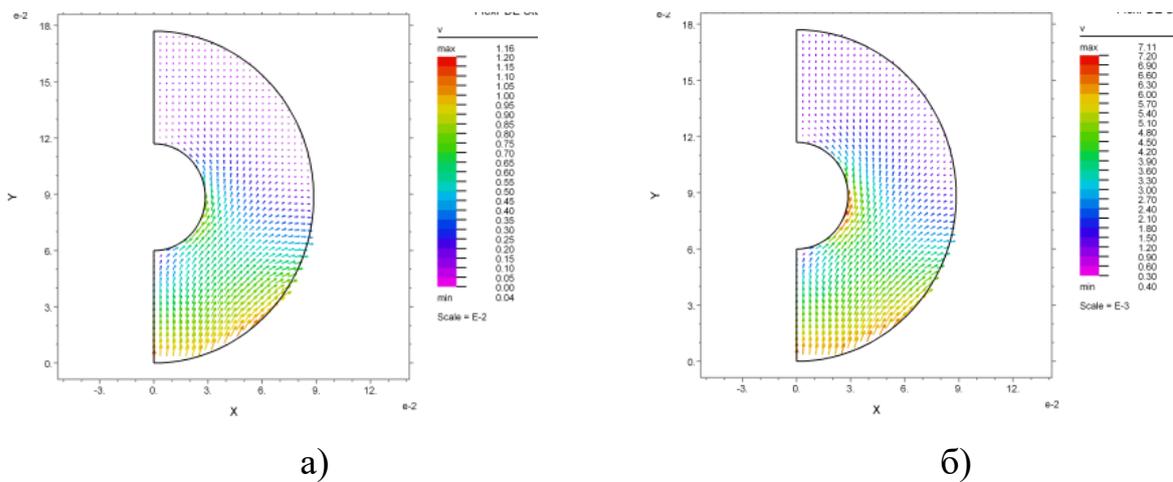


Рис. 3.12. Изменение скоростей в теплоизоляционной конструкции при естественной конвекции: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ .

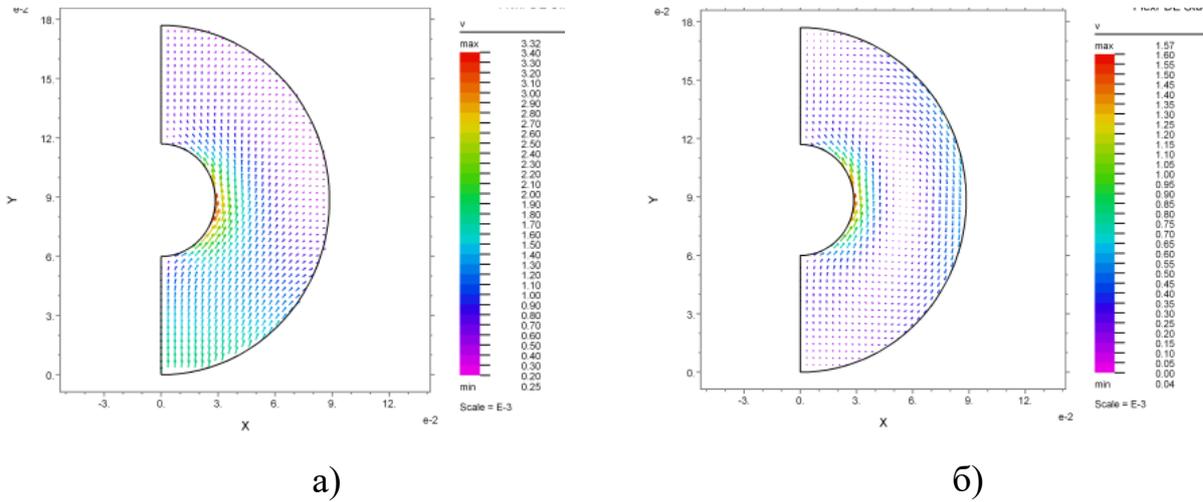


Рис. 3.13. Изменение скоростей в теплоизоляционной конструкции при естественной конвекции: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $K_{p2}=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ .

### 3.4.1.2 Оценка эффективности ТПП в условиях естественной конвекции

Анализ графиков эффективности ТПП применительно к различным диаметрам трубопровода, полученных в результате математического моделирования, и представленных на рис. 3.14-3.18, позволяет сделать вывод, что при условиях естественной конвекции для установления нормального состояния необходим как минимум один слой покрытия.

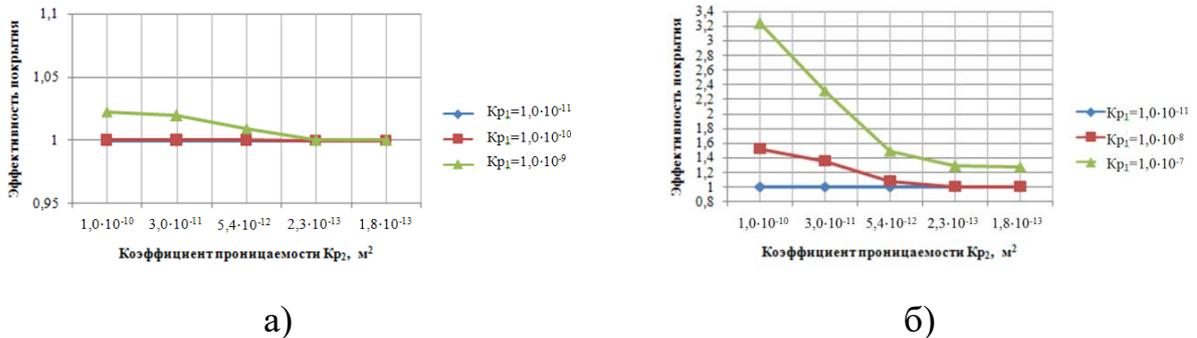
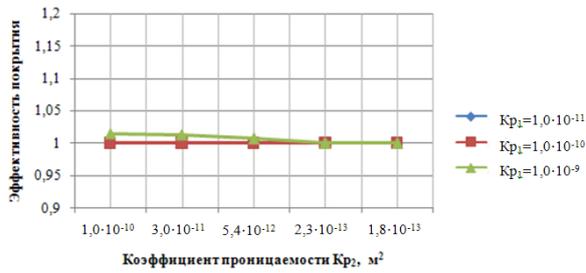
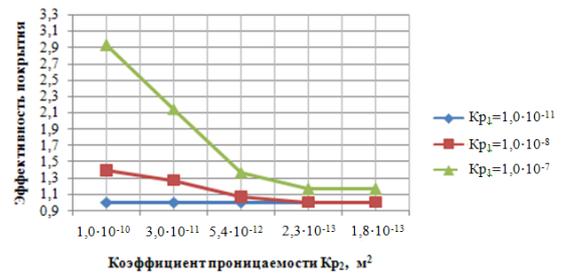


Рис. 3.14. Эффективность ТПП трубопровода диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}, \text{ м}^2$  и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}, \text{ м}^2$ : а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .

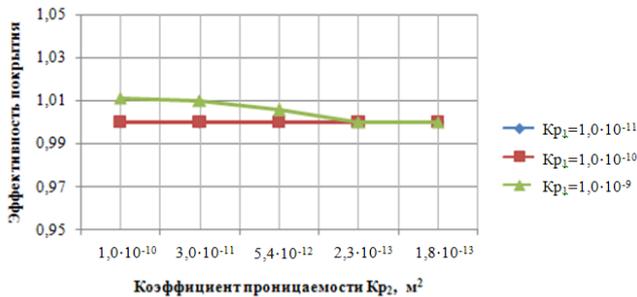


а)

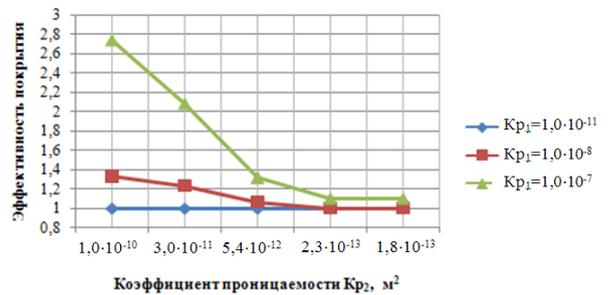


б)

Рис. 3.15. Эффективность ГПП трубопровода диаметром 108 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ ,  $m^2$  и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ ,  $m^2$ : а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .

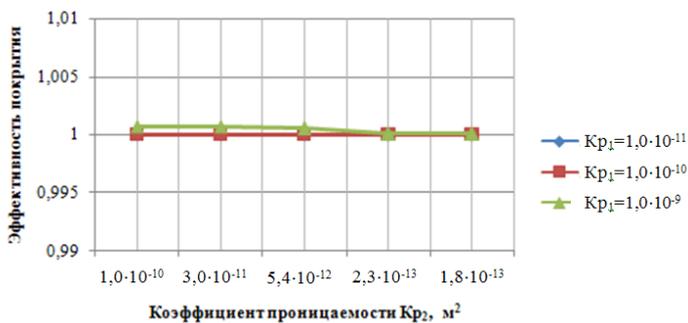


а)

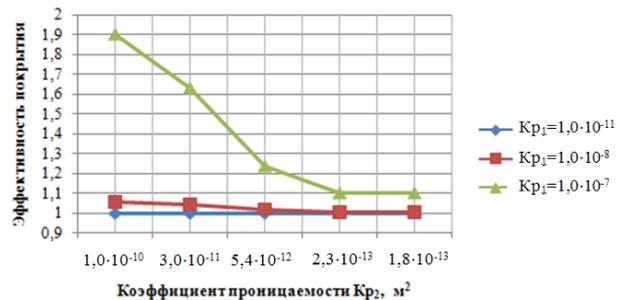


б)

Рис. 3.16. Эффективность ГПП трубопровода диаметром 159 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ ,  $m^2$  и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ ,  $m^2$ : а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .



а)



б)

Рис. 3.17. Эффективность ГПП трубопровода диаметром 325 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ ,  $m^2$  и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ ,  $m^2$ : а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .

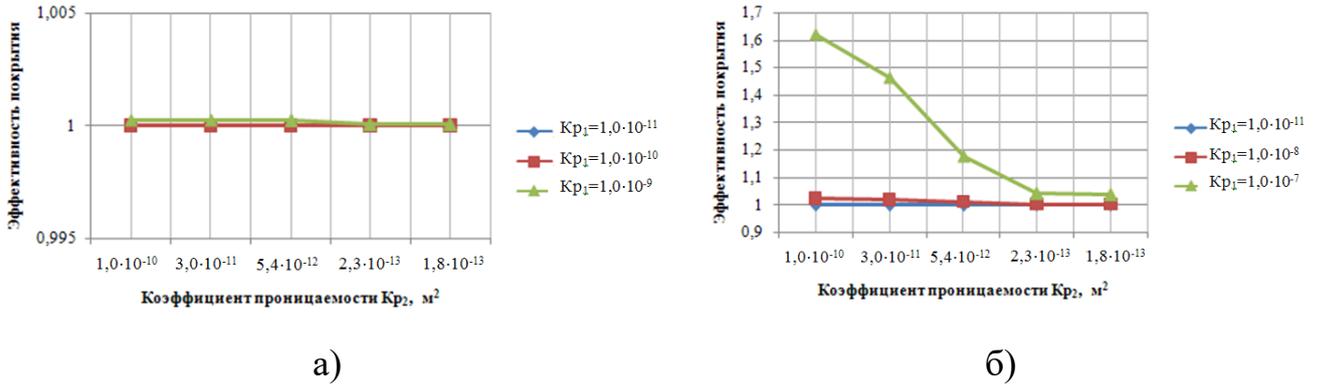


Рис. 3.18. Эффективность ТПИ трубопровода диаметром 530 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ ,  $m^2$  и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ ,  $m^2$ : а) при  $K_{p1} = 1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1} = 1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1} = 1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1} = 1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1} = 1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1} = 1,0 \cdot 10^{-7}$ .

Для естественной конвекции трубопровода с наружным диаметром 57 мм в зависимости от состояния основного изоляционного слоя и состояния покровного слоя характерны следующие показатели эффективности.

Для условий  $K_{p1} = 10^{-9}$  характерны следующие результаты: при разрушенном покровном слое и покровном слое без ТПИ потери составляют в пределах 2%. После нанесения ТПИ в 1 слой потери составляют менее 1%, а уже после нанесения второго слоя соответствуют состоянию при нормальных условиях, т.е. соответствует новой изоляции.

Для условий  $K_{p1} = 10^{-8}$ , характерных для разрушенного покровного слоя, потери превышают 50%, при покровном слое без ТПИ эти показатели составляют 35%, после нанесения первого слоя потери снижаются до 8%, а уже после нанесения второго слоя составляют 5% и приближаются к нормальным условиям. Такие же условия характерны и для остальных диаметров трубопроводов (Приложение 3.1).

### **3.4.2 Обтекание в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе**

#### **3.4.2.1 Распределение полей температур и скоростей в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе**

Для бокового обтекания трубопроводов распределение полей температур носит более интенсивный характер для рассмотренных состояний основного изоляционного слоя при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ , в сравнении с условиями протекания при естественной конвекции.

Поскольку при расположении трубопроводов на открытом воздухе происходит интенсивное поступление холодного воздуха в толщу теплоизоляционной конструкции, за счет неплотностей или ухудшенного состояния покровного или основного изоляционного слоев, и как следствие, картина стационарного движения и полей температур рассматриваемой области резко меняет свое направление.

При вынужденной конвекции достигается максимальная интенсивность конвективного течения и температурное расслоение увеличиваются, что приводит к более интенсивным потерям тепловой энергии, за счет выхолаживания нагретого воздуха при поступлении холодного в теплоизоляционную конструкцию.

Картина изменения температуры в рассматриваемой области меняется при сравнении с естественной конвекцией. Поскольку естественно-конвективное распределение полей температур в значительной степени меньше и наблюдается преобладание внешнего воздействия, которое приводит к перераспределению потоков тепла на холодной и нагретой поверхностях, то это приводит к изменению направления температурного поля.

При естественной конвекции картина распределения температуры в верхней части рассматриваемой области выше, что вызывает перенос тепла вдоль слоя изоляции и наблюдается симметричное движение, состоящее из двух серповидных вихрей. При вынужденной конвекции распределение температурных полей переносится в боковую область, в зависимости от направления внешнего воздействия.

Стоит отметить, что нанесение первого слоя ТПП на поверхность изоляции ( $Kp_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ ) при вынужденном обтекании, не приносит результатов по снижению плотности тепловых потоков.

Изменение полей температур происходит лишь при нанесении второго слоя ТПП при условии  $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$  в обоих представленных случаях при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  (рис. 3.19, 3.20). А нанесение третьего слоя ТПП позволяет получить результаты, близкие к состоянию при условии новой изоляции.

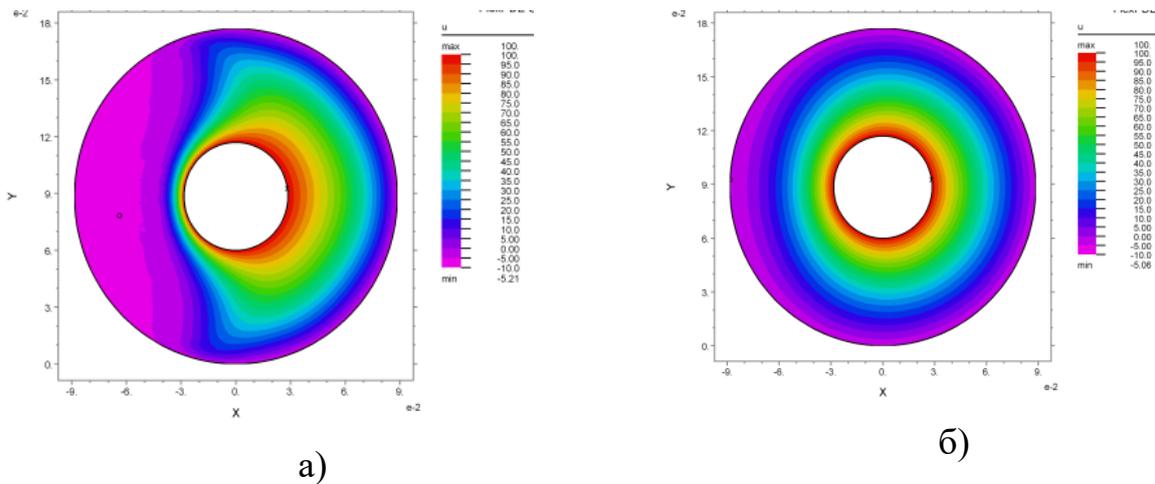


Рис. 3.19. Изменение температурного поля в теплоизоляционной конструкции при вынужденной конвекции: а) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; б) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ .

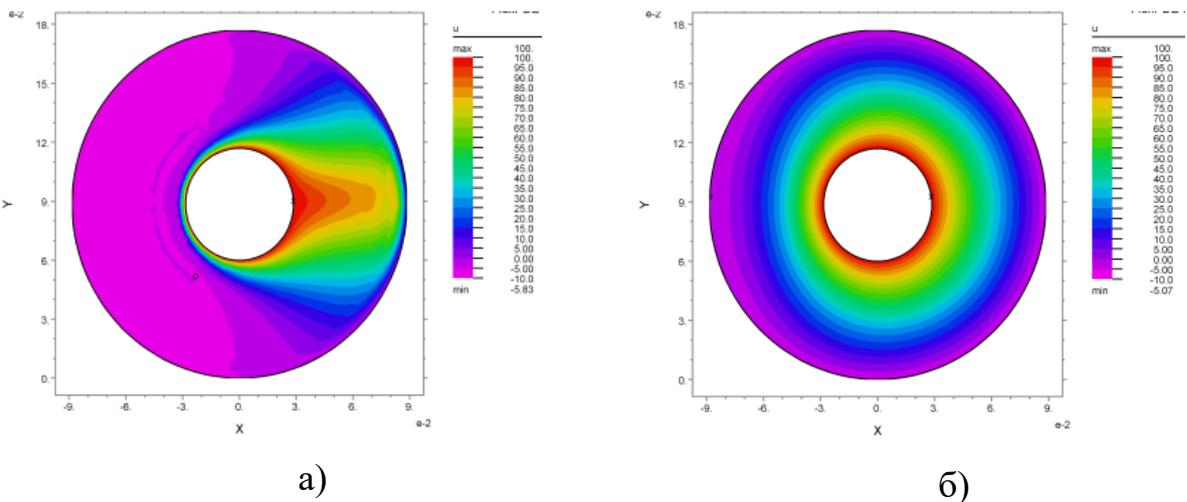


Рис. 3.20. Изменение температурного поля в теплоизоляционной конструкции при вынужденной конвекции: а) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; б) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ .

Подобные картины изменения температурного поля в теплоизоляционной конструкции характерны для всех видов рассмотренных моделей трубопроводов (Приложение 3.2).

Как и при естественной конвекции, для вынужденной конвекции величины скоростей зависят от состояния, как основного изоляционного слоя, так и покровного. В частности, при условии  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  величины скоростей снижаются в 2 раза после нанесения ТПП в два слоя и составляют ( $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ ) (рис. 3.21). Такие же изменения характерны и для условия  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  (рис. 3.22).

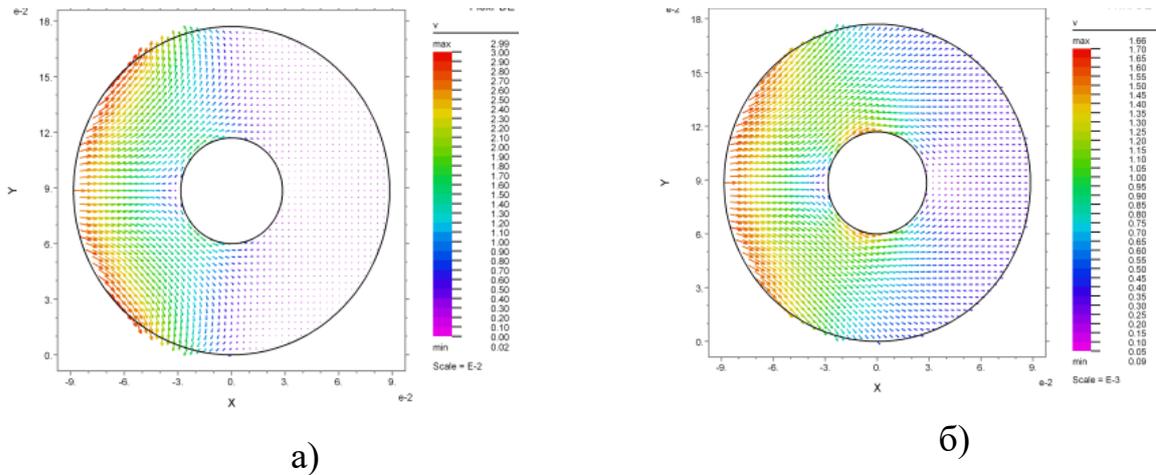


Рис. 3.21. Изменение скоростей в теплоизоляционной конструкции при вынужденной конвекции: а) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; б) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ .

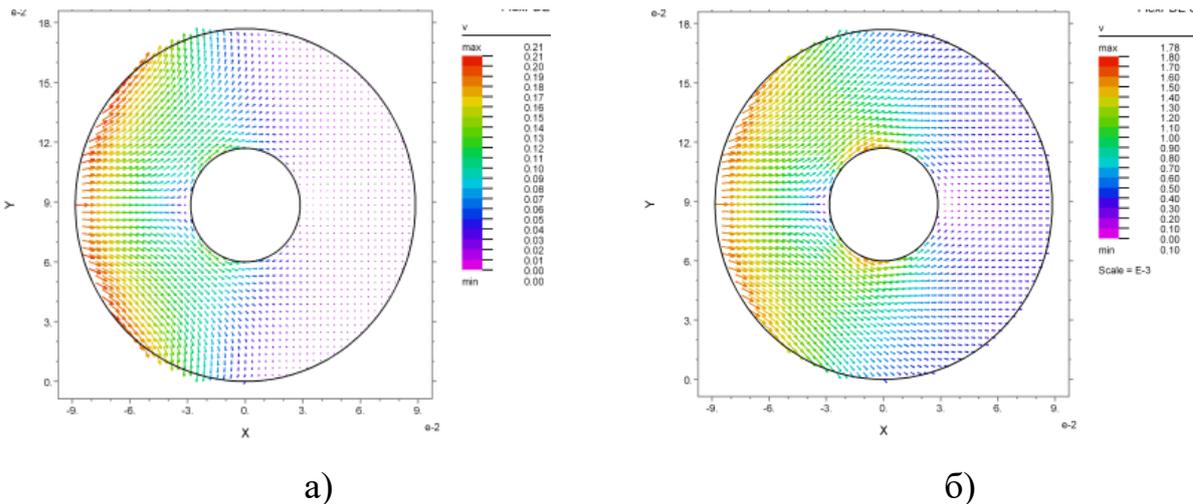


Рис. 3.22. Изменение скоростей в теплоизоляционной конструкции при вынужденной конвекции: а) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$ ; б) при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$  и  $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ .

При вынужденном обтекании трубопроводов необходимо нанесение трех-слойного ТПП. Полученные результаты моделирования в схожих ситуациях совпадают с литературными данными, а также с полученными экспериментальными данными. Таким образом, с точки зрения оценки эффективности, количественная картина показала, что с увеличением количества слоев ТПП эти показатели приближаются к состоянию теплоизоляционной конструкции при нормальных условиях, т.е. соответствуют тепловой изоляции в новом состоянии.

### 3.4.2.2 Оценка эффективности ТПП в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе

Анализ результатов, полученных в процессе теоретической оценки в процессе математического моделирования, позволил сделать следующий вывод. По представленным графикам эффективности ТПП (рис. 3.23-3.27), следует, что при условиях вынужденной конвекции необходимо нанесение как минимум двух слоев ТПП применительно к различным диаметрам трубопровода.

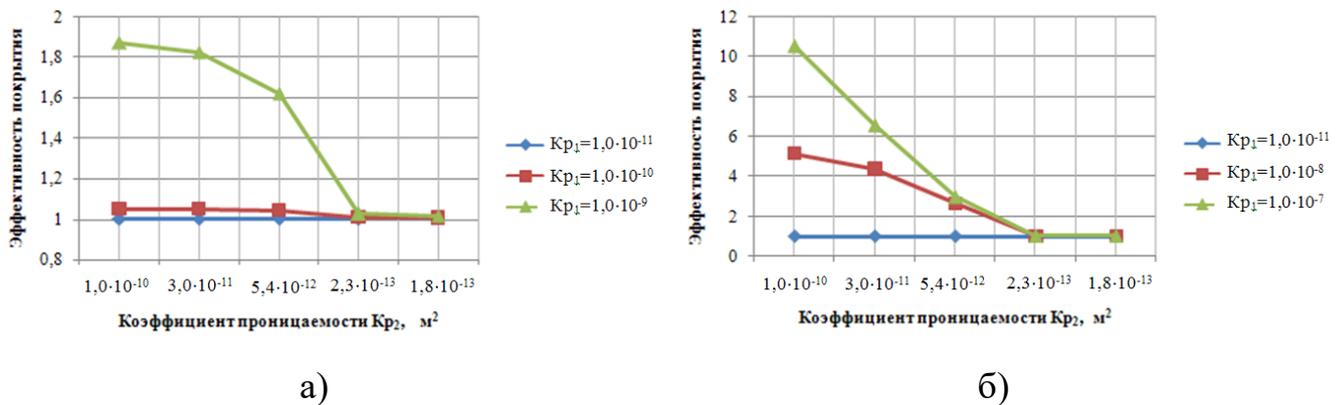


Рис. 3.23. Эффективность ТПП трубопровода диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя К<sub>p1</sub>, м<sup>2</sup> и коэффициент проницаемости покровного слоя К<sub>p2</sub>, м<sup>2</sup>: а) при К<sub>p1</sub>=1,0·10<sup>-11</sup>, К<sub>p1</sub>=1,0·10<sup>-10</sup>, К<sub>p1</sub>=1,0·10<sup>-9</sup>; б) при К<sub>p1</sub>=1,0·10<sup>-11</sup>, К<sub>p1</sub>=1,0·10<sup>-8</sup>, К<sub>p1</sub>=1,0·10<sup>-7</sup>.

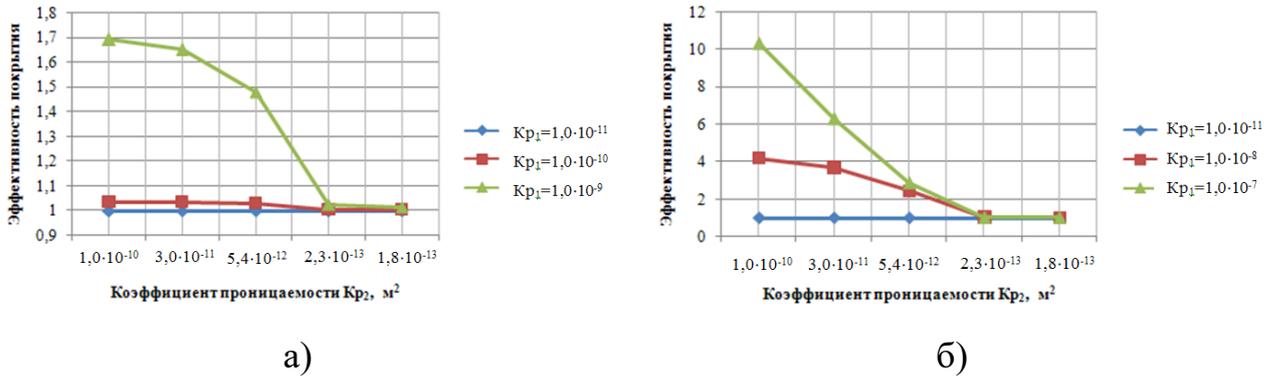


Рис. 3.24. Эффективность ГПП трубопровода диаметром 108 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ , м<sup>2</sup> и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ , м<sup>2</sup>: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .

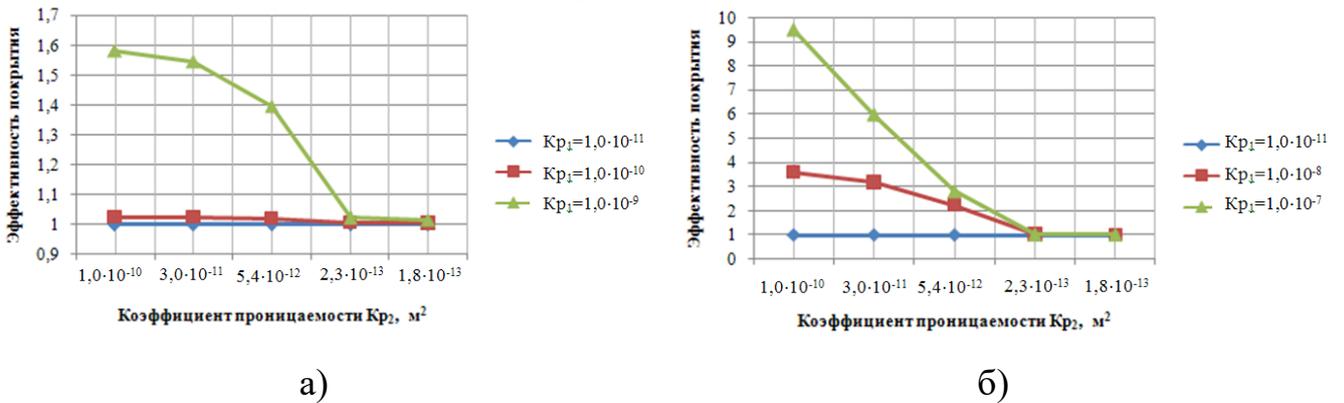


Рис. 3.25. Эффективность ГПП трубопровода диаметром 159 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ , м<sup>2</sup> и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ , м<sup>2</sup>: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .

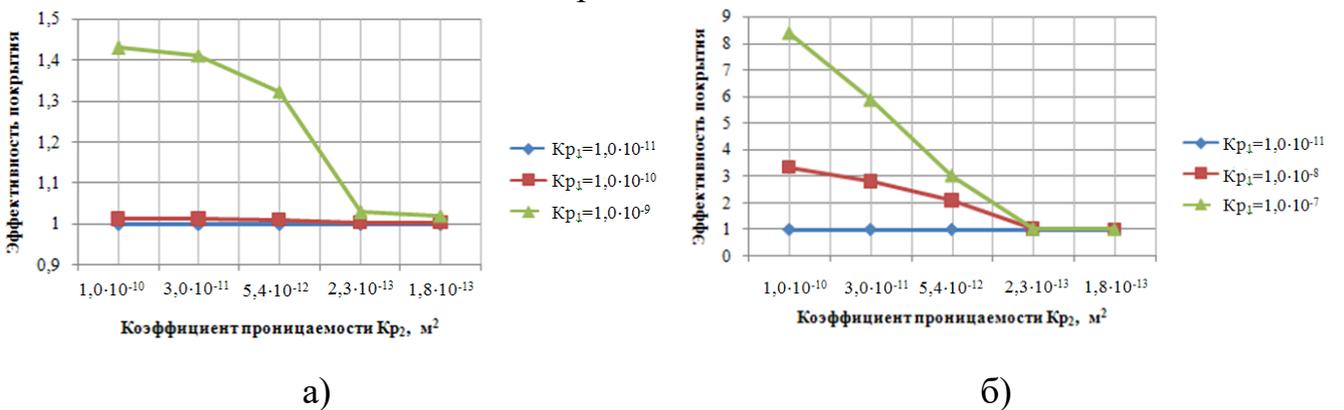


Рис. 3.26. Эффективность ГПП трубопровода диаметром 325 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ , м<sup>2</sup> и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ , м<sup>2</sup>: а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .

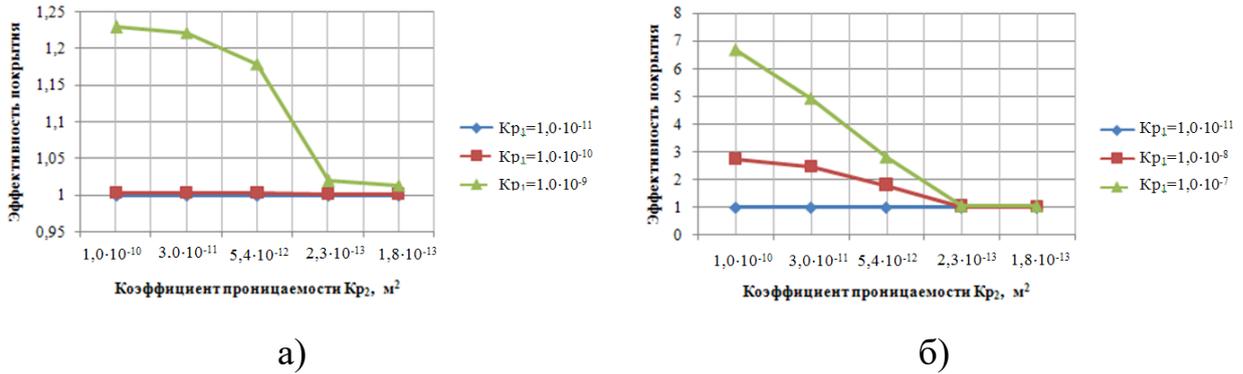


Рис. 3.27. Эффективность ТПП трубопровода диаметром 520 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм, коэффициент проницаемости основного изоляционного слоя  $K_{p1}$ ,  $m^2$  и коэффициент проницаемости покровного слоя  $K_{p2}$ ,  $m^2$ : а) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-10}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9}$ ; б) при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8}$ ,  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-7}$ .

Для условий вынужденной конвекции, где за счет вынужденного обтекания картина носит более интенсивный характер, показатели эффективности следующие. Так, для трубопровода диаметром 57 мм, для условий  $K_{p1}=10^{-9}$  характерны 87% при разрушенном покровном слое, при покровном слое без ТПП 83%, с ТПП в 1 слой потери снижаются до 62%, а после нанесения второго слоя составляют порядка 2,7%.

Для условий  $K_{p1}=10^{-8}$  при разрушенном покровном слое потери тепла увеличиваются в 4 раза и составляют 417%, при покровном слое без ТПП в 3,5 раза (340%), после нанесения первого слоя потери превышают нормативные в 1,7 раза (166%) и после нанесения второго слоя потери составляют 3,2%, а после третьего слоя 2%.

### 3.5 Выводы по главе

Проведено математическое моделирование процессов теплообмена в пористой тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей в зависимости от состояния теплоизоляционных материалов и условий размещения трубопроводов.

Результаты, полученные в процессе математического моделирования, показали их хорошую сходимость с работами других авторов [122-125] и результатами проведенных экспериментов [см. Глава 2].

При моделировании рассмотренной теплоизоляционной конструкции выявлено, что на потери тепловой энергии через теплоизоляционную конструкцию трубопровода тепловой сети, оказывает влияние как состояние основного изоляционного слоя, так и покровного, поскольку увеличение их проницаемости приводит к увеличению потерь тепла с поверхности изоляции.

Показано, что при ухудшении состояния основного изоляционного слоя можно за счет применения ТПП, путем его нанесения на покровный слой, снизить тепловые потери от 5 до 20 % и более.

В условиях, когда трубопроводы расположены в помещении и протекание тепловых процессов в толще теплоизоляционной конструкции осуществляется в условиях естественной конвекции, достаточно нанесения одного слоя ТПП.

При размещении трубопроводов тепловых сетей на открытом воздухе, то есть при внешнем обтекании трубопроводов и протекании тепловых процессов в толще изоляции в условиях вынужденной конвекции, необходимо нанесение как минимум двух слоев ТПП.

## **ГЛАВА 4. Экономическая эффективность практического применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов систем теплоснабжения в составе энерготехнологического комплекса**

### **4.1 Тепловизионная диагностика применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения в реальных условиях**

В качестве энергосберегающего мероприятия для СТС можно рассмотреть восстановление теплозащитных свойств теплоизоляционной конструкции за счет нанесения ТПП.

Для оценки эффективности применения ТПП на теплоизоляционной конструкции трубопровода СТС была проведена тепловизионная диагностика.

Эксперимент проводился на подающем трубопроводе СТС наружным диаметром 133 мм, находящимся в подвале одного из корпусов ФГБОУ ВО КГЭУ. Теплоизоляционная конструкция трубопровода состояла из минераловатной изоляции марки М-100 толщиной 60 мм, покровный слой был выполнен из стеклопластика рулонного марки РСТ-140. На покровный слой теплоизоляционной конструкции действующего трубопровода было нанесено ТПП, рис 4.1. Температура теплоносителя, на момент исследования, составляла  $71,3^{\circ}\text{C}$ , что соответствует температуре сетевой воды при температуре наружного воздуха  $+2^{\circ}\text{C}$ , согласно температурного графика  $150-70^{\circ}\text{C}$ , со срезкой  $135-65^{\circ}\text{C}$ . Схема проведенного исследования представлена на рис. 4.2.



Рис. 4.1. Поверхность теплоизолированного участка трубопровода тепловой сети с нанесенным ТПП и без него

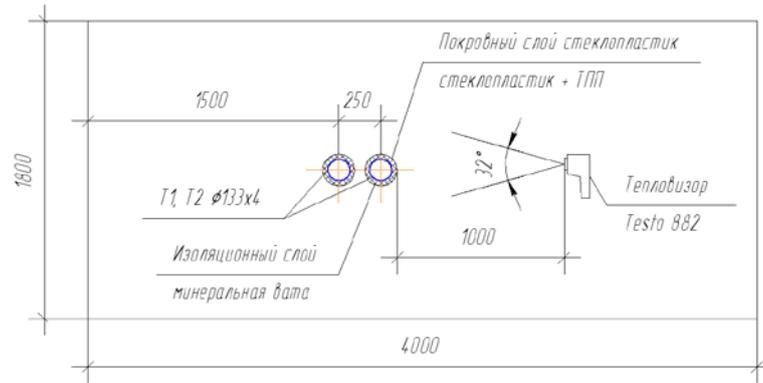


Рис. 4.2. Схема проведения тепловизионной диагностики

Экспериментальные исследования проводились в соответствии с методиками и литературой [154-157], с применением тепловизора Testo 882 (рис. 4.2).

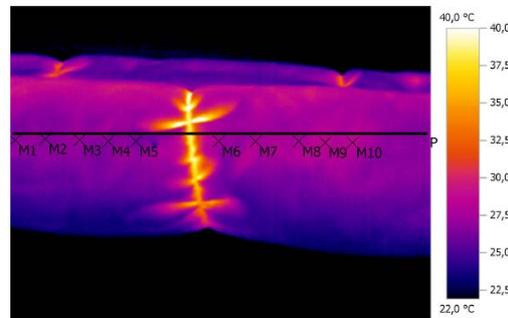


Рис. 4.3. Термограмма исследуемой поверхности трубопровода

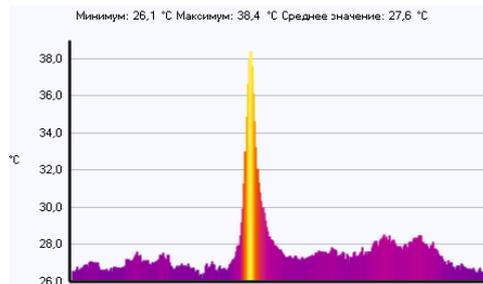


Рис. 4.4. Температурный профиль исследуемой поверхности трубопровода

Анализ результатов тепловизионной съемки, представленный на термограмме и температурном профиле (рис. 4.3 и 4.4), показал, что на участке с нанесенным ТПП наружная температура поверхности соответствует диапазону 26,4-27,1°C, тогда как температура поверхности участка без ТПП лежит в диапазоне 27,7-28,5°C (табл. 4.1). Характерное изменение температур на

поверхности теплоизоляционной конструкции после нанесения ТПП свидетельствует о снижении плотности тепловых потоков.

Таблица 4.1. Температурный диапазон тепловизионной диагностики

| № п/п | Измеряемые объекты  | Температура, °С |
|-------|---------------------|-----------------|
| 1     | Точка измерения М1  | 26,6            |
| 2     | Точка измерения М2  | 26,8            |
| 3     | Точка измерения М3  | 27,1            |
| 4     | Точка измерения М4  | 26,5            |
| 5     | Точка измерения М5  | 26,4            |
| 6     | Точка измерения М6  | 27,7            |
| 7     | Точка измерения М7  | 27,9            |
| 8     | Точка измерения М8  | 27,7            |
| 9     | Точка измерения М9  | 28,5            |
| 10    | Точка измерения М10 | 28,5            |

Представленные результаты сопоставимы с данными, полученными в результате экспериментов и математического моделирования, а также с литературными данными [93-96], что свидетельствует об их хорошем соответствии.

#### **4.2 Техничко-экономическая оценка применения ТПП на поверхности тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения поселка Осиново в составе энерготехнологического комплекса «Майский»**

Как было отмечено выше, одним из аспектов развития распределенной энергетики является повышение энергоэффективности и энергосбережение. Этот аспект рассмотрен на примере ЭТК «Майский» и Осиновской теплоснабжающей компании. Для достижения результатов по энергоэффективности и энергосбережению подобной энергетической системы, решены задачи повышения надежности СТС Осиновского сельского поселения Республики Татарстан и усовершенствования технологической схемы ЭТК «Майский». Таким образом, совокупность действий на стороне потребителя энергии, которые приводят к долгосрочному уменьшению его потребности в энергии, основанное на энергосберегающем мероприятии, и, на стороне источника, приводят к повышению эффективности энергосистемы в целом.

Энерготехнологический комплекс «Майский» - крупнейший в РФ объект малой энергетики. Он стал одним из энергосберегающих проектов, реализуемых в

рамках государственной программы на территории Республики Татарстан. Цель проекта - обеспечение потребностей в электрической и тепловой энергии тепличного комбината «Майский», а также снабжение тепловой энергией поселка Осиново. Энерготехнологический комплекс «Майский» запущен в эксплуатацию в 2011 году, расположен рядом с тепличным комбинатом с одноименным названием и представляет собой современную мини-теплоэлектростанцию со своей котельной.

В состав энергоцентра входят 6 газопоршневых агрегата MWM («Deutz») TCG 2032V16 и генератор единичной электрической мощностью 3,9 МВт. Тепловая мощность газопоршневой генераторной установки при номинальной нагрузке 4,0 МВт. Установка предназначена для работы на природном газе. Установленная электрическая мощность энергоцентра - 23,49 МВт, напряжение 10 кВ. Шесть модулей газопоршневых установок включены параллельно по воде системы теплоснабжения. Холодная обратная вода от теплового потребителя поступает предварительно в охладители систем охлаждения двигателей, а затем подается в утилизационные теплообменные аппараты, после которых направляется непосредственно в прямую магистраль системы теплоснабжения. Так как работа газопоршневых установок может протекать во времени неравномерно (например, при сбросе нагрузки), то в работе мини-ТЭЦ могут возникнуть проблемы (особенно зимой) по отпуску тепла потребителям. Поэтому в мини-ТЭЦ для снятия пиковых нагрузок по отпуску тепла потребителям установлены два котла фирмы «Buderus Logano S825L» 14,7 МВт.

При работе в режиме когенерации тепловая энергия от рубашек охлаждения газопоршневых установок и тепло уходящих газов через теплообменники в зависимости от присоединенной тепловой нагрузки и режимов отпуска тепла напрямую, или с догревом в пиковых водогрейных газовых колах подается в СТС потребителя. При работе в режиме выдачи только электрической мощности вырабатываемое тепло газопоршневых установок утилизируется с выбросом в атмосферу.

Система циркуляции теплоносителя энергоцентра обратная, с включением бака-аккумулятора тепла атмосферного типа емкостью 2000 м<sup>3</sup>. Обратная сетевая вода через теплообменники подается на охлаждение ГПУ.

Отпуск тепла от ЭТК «Майский» производится в горячей воде. Подпитка системы осуществляется исходной водой. ЭТК по надежности отпуска тепла потребителям относится ко второй категории. Система теплоснабжения закрытая зависимая с температурным графиком 95-70 °С.

Поскольку, вырабатываемая ЭТК «Майский» электрическая энергия отдается в общую сеть, а количество произведенной тепловой энергии превышает потребность тепличного комбината, часть выработанного тепла отпускается на нужды теплоснабжения поселка Осиново.

Функциональная структура централизованного теплоснабжения Осиновского сельского поселения представляет собой производство тепловой энергии и передачу ее потребителям – населению, организациям бюджетной сферы, прочим потребителям. Организацией, осуществляющей регулируемую деятельность по теплоснабжению и горячему водоснабжению, является ООО «Осиновская тепло-снабжающая компания». Организация приобретает у ЭТК «Майский» тепловую энергию, и реализует ее потребителям в виде тепла и горячей воды.

СТС поселка Осиново, приведенная в Приложении 4 (рис. 1.1), – централизованная, закрытая, 4-трубная (имеются участки с 3-трубной, а также с независимой 2-трубной схемой присоединения абонентов через объектовые ИТП). Тепловые сети и сети ГВС от ЦТП поселка Осиново до потребителей проложены в основном в надземном исполнении на низких опорах, сети выполнены в основном из стальных труб с тепловой изоляцией из минеральной ваты и ППУ.

Общая протяженность эксплуатируемых участков СТС составляет 7,34 км, сетей ГВС – 6,83 км в 2-трубном исчислении.

Отпуск тепловой энергии потребителям осуществляется по температурному графику 95/70°С.

Удельный вес потерь тепловой энергии в Осиновском сельском поселении имеет один из наиболее высоких показателей среди теплоснабжающих организа-

ций Республики Татарстан, размещающих информацию в соответствии со стандартами раскрытия. Это связано с износом магистральных тепловых сетей до поселка Осиново, а также внутриквартальных сетей отопления и ГВС, где основная часть сетей эксплуатируется с 1976 г. Однако, определение фактических потерь тепловой энергии в тепловых сетях поселка Осиново не проводилось.

Около 70% потерь приходится на внутриквартальные сети поселка Осиново, что объясняется их значительной протяженностью, а также ветхостью тепловой изоляции на большинстве участков.

В связи с ветхостью тепловой и гидроизоляции трубопроводов и ввиду отсутствия данных о фактических потерях тепловой энергии с поверхности тепловой изоляции, при отпуске тепловой энергии принято, что расчетные тепловые потери в сетях превышают 25% от объема отпущенного тепла от источника теплоснабжения. Ввиду того, что существующие внутриквартальные сети диаметром 57-325 мм проложены в основном в 1976-1988 гг., они нуждаются в поэтапной замене, поскольку основной способ прокладки внутриквартальных тепловых сетей, около 85% от общей протяженности, надземным способом на низких опорах с тепловой изоляцией из минеральной ваты. Замена внутриквартальных тепловых сетей планируется в рамках Концессионного соглашения, заключенного между Осиновским сельским поселением и ООО «Осиновская теплоснабжающая компания». Реконструкция будет выполняться в несколько этапов согласно объему финансирования и включает в себя: 1 этап – 2018-2020 гг., 2 этап – 2021-2025 гг., 3 этап – 2026-2030 гг., 4 этап – 2031-2035 гг. В процессе реконструкции планируется демонтаж существующих сетей и подземная бесканальная прокладка новых трубопроводов из предварительно изолированных ППУ трубопроводов, с трассировкой сетей в основном вдоль демонтируемых надземных участков.

Программы реконструкции внутриквартальных тепловых сетей в соответствии с Концессионным соглашением будут реализованы в 7 этапов. Первый этап был реализован в 2017 г., второй этап в 2018 г., третий будет в 2019 г., четвертый в 2020 г., пятый в период с 2021 по 2025 гг., шестой с 2026 по 2030 гг. и седьмой с 2031 по 2035 гг. в соответствии с программой

финансирования потребностей на реализацию мероприятий по проекту реконструкции тепловых сетей поселка Осиново. В каждом этапе реконструкции должна быть осуществлена перекладка трубопроводов системы теплоснабжения, проложенных надземно на определенном участке в соответствии со схемой, приведенной в Приложении 4 (рис. 1.1). Участки сетей, подлежащих реконструкции в соответствии с этапами проведения данных работ приведены в Приложении 4 (рис. 1.2-1.8) и характеристики тепловых сетей в Приложении 5.

В табл. 4.2-4.7 приведены материальные характеристики трубопроводов, подлежащих реконструкции в соответствии с этапами работ, согласно Приложениям 4 и 5.

Таблица 4.2 Материальные характеристики участков тепловой сети по 2 этапу реконструкции (Приложение 4 – рис. 1.3)

| № пп | Диаметр, мм | Протяженность, м |
|------|-------------|------------------|
| 1    | 273         | 73,0             |
| 2    | 219         | 410,0            |
| 3    | 108         | 208,5            |
| 4    | 57          | 120,0            |

Таблица 4.3 Материальные характеристики участков тепловой сети по 3 этапу реконструкции (Приложение 4 – рис. 1.4)

| № пп | Диаметр, мм | Протяженность, м |
|------|-------------|------------------|
| 1    | 219         | 13,0             |
| 2    | 159         | 274,0            |
| 3    | 108         | 80,0             |
| 4    | 76          | 284,0            |
| 5    | 57          | 102,0            |

Таблица 4.4 Материальные характеристики участков тепловой сети по 4 этапу реконструкции (Приложение 4 – рис. 1.5)

| № пп | Диаметр, мм | Протяженность, м |
|------|-------------|------------------|
| 1    | 219         | 186,0            |
| 2    | 159         | 132,0            |
| 3    | 108         | 153,0            |
| 4    | 89          | 13,0             |
| 5    | 76          | 77,0             |
| 6    | 57          | 11,0             |

Таблица 4.5 Материальные характеристики участков тепловой сети по 5 этапу реконструкции (Приложение 4 – рис. 1.6)

| № пп | Диаметр, мм | Протяженность, м |
|------|-------------|------------------|
| 1    | 325         | 711,0            |
| 2    | 108         | 140,0            |
| 3    | 89          | 37,0             |
| 4    | 76          | 369,7            |
| 5    | 57          | 280,5            |

Таблица 4.6 Материальные характеристики участков тепловой сети по 6 этапу реконструкции (Приложение 4 – рис. 1.7)

| № пп | Диаметр, мм | Протяженность, м |
|------|-------------|------------------|
| 1    | 159         | 271,0            |
| 2    | 89          | 92,0             |
| 3    | 76          | 152,0            |
| 4    | 57          | 61,5             |
| 5    | 32          | 138,0            |

Таблица 4.7 Материальные характеристики участков тепловой сети по 7 этапу реконструкции (Приложение 4 – рис. 1.8)

| № пп | Диаметр, мм | Протяженность, м |
|------|-------------|------------------|
| 1    | 89          | 99,9             |
| 2    | 57          | 20,0             |

В соответствии с материальными характеристиками внутриквартальных тепловых сетей системы теплоснабжения ЭТК «Майский» (табл. 4.2-4.7) и с учетом фактического состояния тепловой изоляции трубопроводов, согласно [173], с учетом превышения тепловых потерь на 25% от удельных расчетных нормативных показателей, среднегодовые величины потерь тепла с поверхности изоляционного слоя подающего  $Q_{\text{пи}}$ , Гкал и обратного  $Q_{\text{ои}}$ , Гкал трубопроводов за отопительный период, рассчитанные по методике [174], в согласно формул 4.1-4.3, приведены в табл. 4.8.

$$Q_{\text{пи}} + Q_{\text{ои}} = \beta \cdot (\sum_{i=1}^n q_{\text{пи}} l_{\text{пи}} + \sum_{i=1}^m q_{\text{ои}} l_{\text{ои}}) \cdot 24 \cdot z \cdot 10^{-6}, \quad (4.1)$$

где  $q_{\text{пи}}$ ,  $q_{\text{ои}}$  – нормы плотности теплового потока через поверхность изоляции трубопроводов, Вт/м;

$l_{\text{пи}}$ ,  $l_{\text{ои}}$  – протяженность  $i$ -ых участков трубопроводов, соответственно, подающего и обратного трубопроводов, м;

$z$  – продолжительность работы тепловых сетей в планируемом периоде, сут.;

$n$  – количество участков тепловой сети;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий тепловой поток через изолированные опоры труб, фланцевые соединения и арматуру.

Для участков надземной прокладки:

для подающего трубопровода

$$q_{\text{пi}} = q_{\text{нпi}} \frac{(t_{\text{п}}^{\text{cp}} + t_{\text{нв}}^{\text{cp}})}{(t_{\text{п}}^{\text{cp},\text{r}} + 5)}, \quad (4.2)$$

для обратного трубопровода

$$q_{\text{oi}} = q_{\text{ноi}} \frac{(t_{\text{o}}^{\text{cp}} + t_{\text{нв}}^{\text{cp}})}{(t_{\text{o}}^{\text{cp},\text{r}} + 5)}, \quad (4.3)$$

где  $q_{\text{нпi}}$ ,  $q_{\text{ноi}}$  – соответственно нормы плотности теплового потока, Вт/м [ккал/(ч·м)], для подающего и обратного трубопроводов при среднегодовых значениях температур теплоносителя и наружного воздуха, принятых при расчете норм;

$q_{\text{пi}}$ ,  $q_{\text{oi}}$  – соответственно нормы плотности теплового потока, Вт/м [ккал/(ч·м)], для конкретных значений усредненных за планируемый период температур теплоносителя в подающем и обратном трубопроводах и температуры наружного воздуха;

$t_{\text{нв}}^{\text{cp}}$  – средняя температура наружного воздуха за рассматриваемый период, °С, принимается по данным местной метеостанции или по [145];

5 – температура наружного воздуха, при котором рассчитаны нормы плотности теплового потока для трубопроводов, °С.

Таблица 4.8. Среднегодовые потери тепла с поверхности изолированного трубопровода, с учетом тарифа на тепловую энергию на 2018 г. (1 022,21 руб./Гкал)

| № пп | Этапы проектирования | $Q_{\text{пi}}$ , Гкал | $Q_{\text{oi}}$ , Гкал | Суммарные потери $Q_{\text{пi}} + Q_{\text{oi}}$ , руб. |
|------|----------------------|------------------------|------------------------|---|
| 1    | 2 этап               | 208,05                 | 176,96                 | 393 561,07  |

|   |        |         |        |              |
|---|--------|---------|--------|--------------|
| 2 | 3 этап | 150,49  | 126,24 | 282 876,17   |
| 3 | 4 этап | 136,48  | 115,51 | 257 586,70   |
| 4 | 5 этап | 414,25  | 353,21 | 784 505,29   |
| 5 | 6 этап | 134,56  | 112,65 | 252 700,53   |
| 6 | 7 этап | 20,91   | 17,46  | 39 222,20    |
| 7 | Итого: | 1064,74 | 902,03 | 2 010 451,96 |

Стоимость суммарных среднегодовых потерь тепловой энергии с поверхности изолированных трубопроводов системы теплоснабжения Осиновского сельского поселения по участкам сети, не прошедших реконструкцию, составляют 2 010 451,96 руб. в год.

Ввиду неудовлетворительного состояния трубопроводов СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский», программой реконструкции предусмотрена перекладка трубопроводов системы теплоснабжения, проложенных надземно. Участки, подлежащие поэтапной реконструкции в соответствии со схемой СТС, приведены в Приложении 4. Достижение поставленных задач по реконструкции, занимает достаточно длительный промежуток времени, а для потребителей важно уже сейчас получать качественную тепловую энергию. Для этого предложен гибкий подход к повышению эффективности тепловой изоляции внутриквартальной системы теплоснабжения. До полной замены трубопроводов, рекомендовано применение ТПП в общей конструкции существующей тепловой изоляции. По данным, представленным выше, применение ТПП позволит снизить среднегодовые показатели потерь тепла с поверхности изоляции трубопроводов в среднем до 20%, которые составят (табл. 4.9). Это мероприятие позволит реализовать программу повышения эффективности трубопроводов систем теплоснабжения с меньшими потерями, дождаться полной реконструкции, при небольших затратах, с учетом изменчивости стоимости тепловой энергии и расходов на это мероприятие.

Таблица 4.9. Среднегодовые показатели потерь тепла с поверхности изолированного трубопровода после нанесения ТПП, с учетом тарифа на тепловую энергию на 2018 г. (1 022,21 руб./Гкал)

| № пп | Этапы проектирования | $Q_{\text{пи}}$ , Гкал | $Q_{\text{ои}}$ , Гкал | Суммарные потери $Q_{\text{пи}} + Q_{\text{ои}}$ , руб. |
|------|----------------------|------------------------|------------------------|---|
|------|----------------------|------------------------|------------------------|---|

|   |        |        |        |              |
|---|--------|--------|--------|--------------|
| 1 | 2 этап | 166,44 | 141,57 | 314 850,9    |
| 2 | 3 этап | 120,39 | 100,99 | 226 296,85   |
| 3 | 4 этап | 109,18 | 92,41  | 206 067,31   |
| 4 | 5 этап | 331,40 | 282,57 | 627 606,27   |
| 5 | 6 этап | 107,65 | 90,12  | 202 162,47   |
| 6 | 7 этап | 16,73  | 13,97  | 31 381,847   |
| 7 | Итого: | 851,79 | 721,62 | 1 608 355,44 |

С целью оценки затрат и сбережения энергии в виде снижения потерь тепловой энергии при ее передаче после нанесения ТПП на поверхность существующей изоляции трубопроводов тепловых сетей была проведена технико-экономическая оценка для определения общих затрат (инвестиций), годового чистого сбережения, срока окупаемости и прибыльности данного мероприятия с использованием следующей методики [153].

Инвестиции включает все затраты, связанные с общими вложениями на внедрение энергосберегающего мероприятия. Они включают следующие статьи затрат - проект, стоимость оборудования, стоимость материалов, монтаж и наладка, другие затраты, налоги.

Годовое чистое сбережение – чистые ежегодные сбережения, получаемые после внедрения энергосберегающего мероприятия или проекта, определяется по формуле:

$$B=S \cdot E, \quad (4.4)$$

где  $S$  – сбереженная за год энергия, Гкал/год;  $E$  – стоимость единицы энергии, руб./Гкал.

Срок окупаемости – время, которое необходимо, чтобы инвестиции окупались, определяется по следующему выражению:

$$PB= I_0/B, \quad (4.5)$$

где  $I_0$  – инвестиции, тыс. руб.

Коэффициент чистой существующей прибыли, позволяющий определить наиболее прибыльное мероприятие, определяется по:

$$NPVQ=NPV/I_0, \quad (4.6)$$

Чистая существующая прибыль определяется по выражению

$$NPV=B \cdot [(1-(1+r)^{-n})/r]-I_0, \quad (4.7)$$

где  $r$  – реальная процентная ставка,  $n$  – экономический срок службы мероприятия.

Реальная процентная ставка определяется по выражению:

$$r=(n_r-b)/(1+b), \quad (4.8)$$

где  $n_r$  – номинальная процентная ставка (соответствует заемной процентной ставке банка),  $b$  – уровень инфляции.

В результате расчета технико-экономической оценки эффективности применения ТПП на поверхности трубопроводов СТС поселка Осиново, при расходе ТПП 1,2 л/м<sup>2</sup> и стоимости 1 л в размере 120,00 руб./л, с учетом покрасочных работ и величин экономии тепловой энергии, приведенных в табл. 4.8 и 4.9, получены следующие результаты (табл. 4.10). Стоит отметить, что данное мероприятие окупится на 3 этапе реконструкции.

Таблица 4.10 Результаты технико-экономической оценки нанесения ТПП на поверхность изоляции трубопроводов СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский»

| № п/п | Наименование мероприятия  | Инвестиции, руб. | Сбереженная за год энергия, Гкал/год | Годовое чистое сбережение, руб./год | Срок окупаемости, лет |
|-------|---|------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------|
| 1     | Нанесение ТПП на поверхность изоляции трубопроводов СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский» | 616 534,00       | 393,354                              | 402 090,4                           | 1,5                   |

Таким образом, данное энергосберегающее мероприятие приводит к снижению потерь тепла при передаче тепловой энергии, тем самым повышая качество теплоносителя непосредственно у потребителя.

Помимо существующих потребителей тепла, на прилегающей территории ведется интенсивная застройка жилыми комплексами «Радужный» и «Салават Купере», а также сопутствующими объектами социального значения – поликлиниками, детскими садами, школами и т.д. Ввиду ожидаемого увеличения спроса на тепловую энергию для нужд теплоснабжения, необходимо повысить эффективность источника энергоснабжения ЭТК «Майский».

До недавнего времени применение газопоршневых установок, сдерживалось из-за высокой эмиссии оксидов азота и углерода. Использование новейших технологий, предусматривающих сжигание «обедненной» топливной смеси, приме-

нение автоматических регуляторов соотношения воздух-топливо и электронного зажигания позволяет снизить выбросы вредных веществ до показателей, удовлетворяющих существующим экологическим нормам. Следует отметить, что газопоршневые агрегаты способны длительное время работать при частичных нагрузках без ущерба для своего ресурса показателей, удовлетворяющих существующим экологическим нормам. В связи с этим усовершенствование технологических схем, с целью снижения вредного воздействия уходящих дымовых газов, носит актуальный характер.

Внедрение такой системы позволит не только полезно использовать уходящие дымовые газы, но и снизить негативное воздействие на окружающую среду, что благоприятно скажется на экологической ситуации в месте расположения ЭТК «Майский». Схема установки селективного каталитического реактора в общую схему ГПУ представлена на (рис. 4.5).

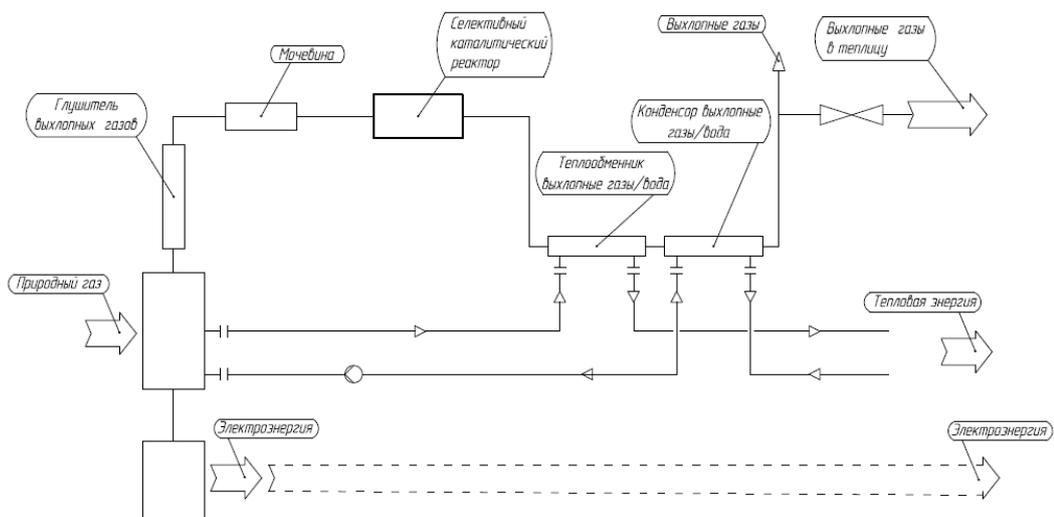


Рис. 4.5. Пример установки селективного каталитического реактора в общую схему ГПУ

К тому же, любая теплоэнергетическая система условно делится на три основных составляющих - производство тепловой энергии; транспортировка тепловой энергии потребителю по трубопроводам СТС; потребление тепловой энергии. Каждый из приведенных составляющих системы обладает характерными непроизводительными потерями, снижение которых и является основной функцией энергосбережения. Снижение потерь тепловой энергии в магистральных и рас-

пределительных СТС, с целью экономии топлива при производстве электрической и тепловой энергии на базе ЭТК «Майский» имеют большое значение. Особенно это отразится в периоды максимального теплопотребления, приходящиеся на отопительный период, когда для обеспечения тепловой нагрузки в систему подключаются пиковые котлы.

Увеличение тепловой мощности котлов, за счет роста количества потребителей в допустимом диапазоне, обеспечивающем эффективную работу в номинальном режиме, при условии снижения потерь тепловой энергии при транспортировке, позволит рационально расходовать топливо и повысить качество тепловой энергии у потребителей, согласно [3].

Так по анализу за 2018 год, общий объем потребления природного газа в ЭТК «Майский» пиковыми водогрейными котлами составил 517,95 тыс. м<sup>3</sup> и объем произведенной тепловой энергии 3867,43 Гкал/год. При этом удельный расход топлива на выработку 1 Гкал тепла составил 161 кг у.т./Гкал. Снижение потерь тепловой энергии при транспортировке на 20% за счет применения ТПП позволит снизить объем производства тепловой энергии в пиковых водогрейных котлах на 773,49 Гкал/год и общий расход топлива составит 414,36 тыс. м<sup>3</sup>. Таким образом, расход газа на выработку тепловой энергии в пиковых водогрейных котлах в среднем, с учетом сокращения потерь тепловой энергии при транспортировке по данным за 2018 год сократится на 103,59 тыс. м<sup>3</sup>.

Объем расхода газа в газопоршневых установках составил 10627,12 тыс. м<sup>3</sup>, а объем выработанной тепловой энергии 87094,00 Гкал/год. Снижение потерь тепловой энергии при транспортировке в СТС за счет применения ТПП в общей конструкции тепловой изоляции позволит освободить порядка 16695,59 Гкал/год (отпуск тепловой энергии за 2018 год составил 83477,94 Гкал/год). Это позволит безболезненно увеличить количество потребителей тепловой энергии, а также рационально использовать топливо, при номинальном режиме работы газопоршневых установок в соответствии с требуемой мощностью, задаваемой оперативно-диспетчерским управлением энергосистемы. Общая схема энерготехнологическо-

го комплекса «Майский» с учетом рекомендованных энергосберегающих мероприятий, представлена на (рис. 4.6).

Стоит отметить, что потенциал распределенной когенерации для страны в целом, может полностью закрыть возможную потребность в дополнительных генерирующих мощностях. Поскольку основой новой технологической парадигмы в энергетической системе являются конечные устройства потребителей с управляемым спросом, а также распределенная генерация и системы хранения энергии, находящиеся на стороне потребителей и либо или в распределительных сетях низкого и среднего напряжения в непосредственной близости от потребителей.

При условии активного развития распределенной энергетики, открываются возможности получения системных эффектов для всех сторон. Так в рассматриваемом варианте, когда, снижая потери тепловой энергии в СТС и внедряя дополнительное оборудование в состав мини-ТЭЦ, системный эффект заключается в следующем.

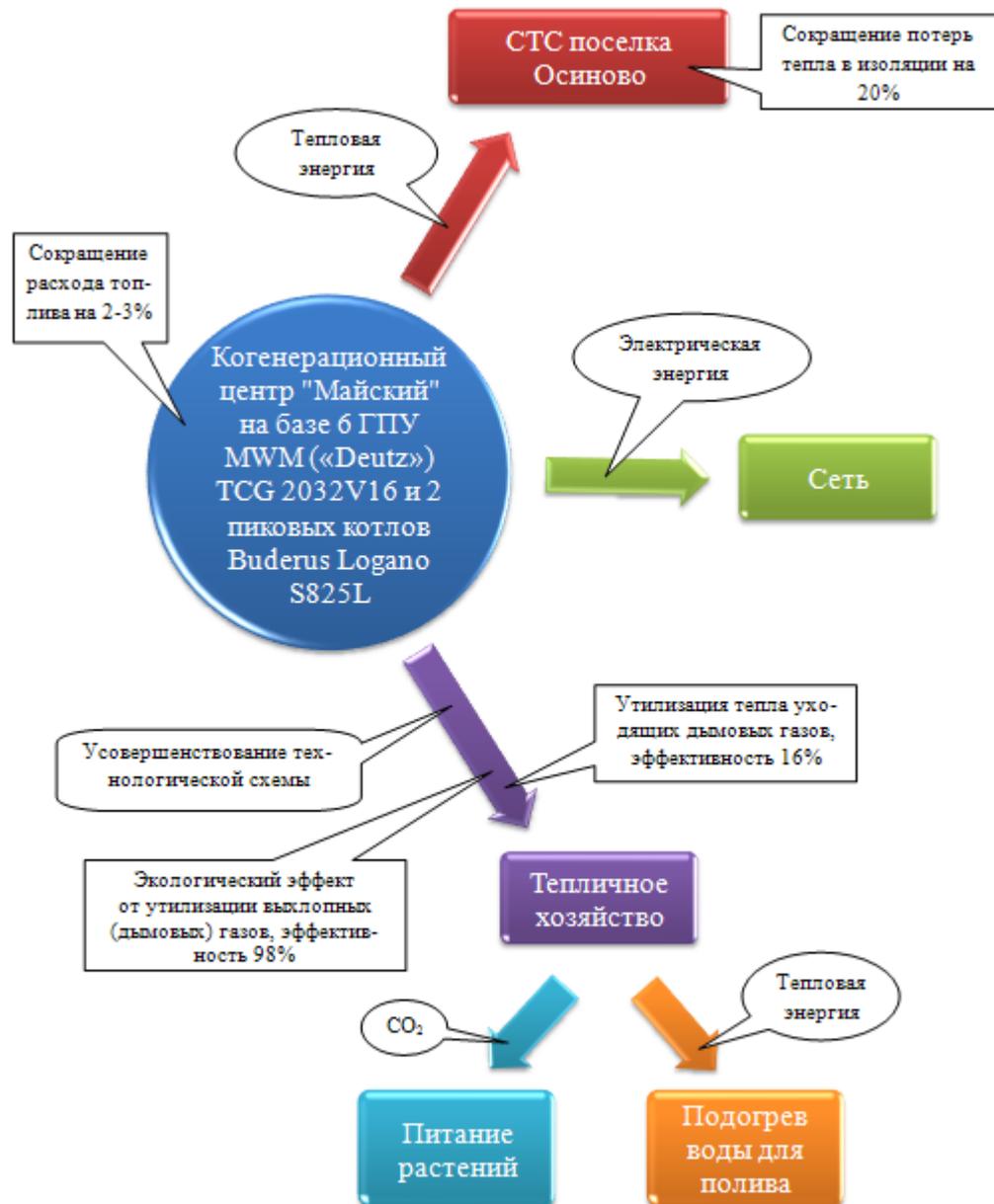


Рис. 4.6 Схема энерготехнологического комплекса «Майский»

Осуществляется снижение выбросов уходящих дымовых газов в атмосферу, что приводит к улучшению экологической ситуации на рассматриваемой территории, а отработавший углекислый газ может использоваться в качестве органического удобрения для растений, тем самым повышая производительность тепличного комбината.

Осуществляется утилизация тепла уходящих дымовых газов, используемого для нужд тепличного хозяйства.

Уменьшаются потери тепла с поверхности изоляции трубопроводов СТС путем применения дополнительного ТПП в общей теплоизоляционной конструкции.

Улучшение состояния трубопроводов СТС приводит к увеличению производительности оборудования ЭТК «Майский», при этом снижаются расходы топлива когенерационной системы на базе мини-ТЭЦ на выработку тепловой и электрической энергии.

Вышеперечисленные эффекты от совершенствования СТС и технологии когенерации энергоцентра позволят контролировать надежность и качество поставляемой тепловой и электроэнергии при соответствующем изменении стоимости производства. Совокупный системный эффект от предложенных мероприятий представлен в табл. 4.11.

Таблица 4.11. Совокупный системный эффект

| № п/п | Системный эффект  | Эффективность, % |
|-------|---|------------------|
| 1     | Снижение выбросов уходящих дымовых газов в атмосферу  | 98%              |
| 2     | Утилизация тепла уходящих дымовых газов   | 16%              |
| 3     | Сокращение потерь тепла с поверхности изоляции трубопроводов СТС путем применения дополнительного ТПП | 20%              |
| 4     | Снижение расходов топлива энергоцентра «Майский» на базе когенерационной системы                      | 2-3%             |

### 4.3 Выводы по главе

Проведена тепловизионная диагностика эффективности применения ТПП на поверхности существующей изоляции трубопроводов СТС. Результаты тепловизионной диагностики подтвердили, что внедрение результатов диссертационного исследования способствовали снижению тепловых потерь за счет снижения плотности тепловых потоков, что свидетельствует о повышении эффективности тепловой изоляции. Установлено, что результаты исследований качественно соответствуют данным других авторов.

Разработан способ энергосбережения и повышения энергоэффективности существующей тепловой изоляции трубопроводов СТС поселка Осиново Зеленодольского района Республики Татарстан в составе ЭТК «Майский» за счет применения ТПП. Данный способ повышения энергоэффективности при передаче тепловой энергии за счет внедрения энергосберегающего мероприятия по модернизации и ремонту существующей изоляции приводит к снижению тепловых потерь с поверхности изолированного трубопровода.

Приведены результаты расчетов среднегодовых потерь тепловой энергии в соответствии с материальными характеристиками внутриквартальных тепловых сетей системы теплоснабжения поселка Осиново и с учетом фактического состояния тепловой изоляции трубопроводов, в соответствии с превышением тепловых потерь на 25% от среднегодовых удельных расчетных нормативных показателей. Среднегодовая величина потерь тепла за отопительный период составляет в подающем трубопроводе 1 064,74 Гкал/год и в обратном 902,03 Гкал/год. В денежном выражении суммарная стоимость составит 2 010 451,96 тыс. руб., в соответствии с тарифом на тепловую энергию ООО «Осиновская теплоснабжающая компания» на 2018 г. в размере 1 022,21 руб./Гкал.

Представлены результаты расчетов среднегодовых показателей потерь тепла с поверхности изолированного трубопровода после нанесения ТПП, приводящие к их снижению на 20%.

Проведена технико-экономическая оценка эффективности применения ТПП на поверхности существующей изоляции внутриквартальных сетей СТС Осинковского сельского поселения. Результаты расчета показали целесообразность внедрения данного мероприятия со сроком окупаемости 1,5 года. Полученные данные свидетельствуют о том, что уже на 3 тапе реконструкции можно добиться снижения потерь тепла, что позволит реализовать программу повышения надежности трубопроводов СТС с меньшими потерями, дождаться полной реконструкции, при небольших затратах, с учетом изменения (роста) стоимости тепловой энергии.

Предложен способ усовершенствования технологической схемы источника энергоснабжения энерготехнологического комплекса «Майский», с целью снижения вредного воздействия уходящих дымовых газов.

Приведен совокупный системный эффект от применения ТПП в общей конструкции тепловой изоляции трубопроводов СТС и влияние его на повышение эффективности энергетической системы в целом на примере объекта распределенной энергетики энерготехнологического комплекса «Майский».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации рассмотрена одна из актуальных проблем энергетического комплекса – повышение эффективности ЭТК и входящих в их состав СТС – снижение потерь тепловой энергии при транспортировке через поверхность изолированных трубопроводов и повышение эффективности существующей традиционной изоляции, за счет своевременного проведения ремонтно-восстановительных работ теплоизоляционных конструкций за счет применения ТПП.

Проведены экспериментальные исследования по определению коэффициента теплопроводности, интегрального коэффициента излучения и воздухопроницаемости теплоизоляционной конструкции, состоящей из минеральной ваты, стеклопластика и ТПП. Установлено, что наибольшее влияние на снижение плотности тепловых потоков оказывает воздухопроницаемость теплоизоляционного материала после нанесения на его поверхность ТПП.

Разработана экспериментальная установка по определению плотности тепловых потоков, проходящих через конструкцию тепловой изоляции трубопровода на основе метода неограниченного цилиндрического слоя. Результаты исследований показали, что нанесение ТПП привело к снижению плотности тепловых потоков на 17%.

Проведено математическое моделирование процессов теплообмена в пористой тепловой изоляции трубопроводов СТС в зависимости от состояния теплоизоляционных материалов и условий размещения трубопроводов. Результаты, полученные в процессе математического моделирования, показали их хорошую сходимость с работами других авторов и результатами проведенных экспериментов.

Проведена оценка эффективности применения ТПП в структуре традиционной тепловой изоляции трубопроводов тепловых сетей. Показано, что при ухудшении состояния основного изоляционного слоя можно за счет применения ТПП, путем его нанесения на покровный слой, снизить тепловые потери от 5 до 20 % и более. В условиях, когда трубопроводы расположены в помещении и протекание тепловых процессов в толще теплоизоляционной конструкции осуществляется в условиях естественной конвекции, достаточно нанесения одного слоя ТПП. При

размещении трубопроводов СТС на открытом воздухе, где протекание тепловых процессов в толще изоляции осуществляется в условиях вынужденной конвекции, необходимо нанесение как минимум двух слоев ТПП, для достижения результатов по снижению потерь тепла при транспортировке.

Приведен способ энергосбережения и повышения энергоэффективности существующей тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения поселка Осиново Зеленодольского района Республики Татарстан входящих в состав энерготехнологического комплекса «Майский» за счет применения ТПП. Проведена технико-экономическая оценка эффективности применения ТПП на поверхности существующей изоляции внутриквартальных сетей теплоснабжения Осиновского сельского поселения. Результаты расчета показали целесообразность внедрения данного мероприятия со сроком окупаемости 1,5 года.

Предложен способ усовершенствования технологической схемы источника энергоснабжения ЭТК «Майский», с целью снижения вредного воздействия уходящих дымовых газов.

Приведен совокупный системный эффект от применения ТПП в общей конструкции тепловой изоляции трубопроводов СТС и влияние его на повышение эффективности энергетической системы в целом на примере объекта распределенной энергетики ЭТК «Майский».

Полученные результаты диссертационной работы целесообразно использовать на этапе проектирования, для прогнозирования динамики ухудшения свойств тепловой изоляции, на этапе эксплуатации для оценки состояния теплоизоляционных конструкций, повышения их эффективности и своевременного восстановления теплозащитных свойств. Предложенный способ энергосбережения при транспортировке тепловой энергии в СТС позволит улучшить финансово-экономические показатели предприятий, повысить их инвестиционную привлекательность при проведении работ по модернизации, реконструкции и техническом перевооружении. Это позволит повысить экономические показатели энергетических систем, как на региональном, так и федеральном уровнях.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ЭТК – энерготехнологический комплекс; СТС – системы теплоснабжения; ТПП – тонкопленочное покрытие;

$$Bi = \frac{\alpha R}{\lambda} - \text{число Био};$$

$$Da = \frac{K}{R^2} - \text{число Дарси};$$

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{R^2} - \text{число Фурье};$$

$$Gr = \frac{g d^3}{\nu^2} \beta \Delta t - \text{число Грасгофа};$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} - \text{число Нуссельта};$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} - \text{число Прандтля};$$

$$Ra = \frac{\beta g \Delta T L d^2}{\nu a} - \text{фильтрационное число Рэлея};$$

$$Re = \frac{w d}{\nu} - \text{число Рейнольдса};$$

$c_F$  – коэффициент Форцгеймера;

$d$  - диаметр, м;

$g$  - ускорение свободного падения,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости,  $\text{Па} \cdot \text{с}$ ;

$\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$q$  - плотность теплового потока,  $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;

$K$  – коэффициент проницаемости пористой среды,  $\text{м}^2$ ;

$\bar{v}$  – вектор скорости;

$p$  – отклонение давления от статистического;

$\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$\sigma$  – коэффициент теплоемкости,  $\text{Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$

$R$  – радиус цилиндрической поверхности, м;

$T$  – абсолютная температура, К;

$t$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\delta$  – толщина теплоизоляционного слоя, м;

$\varepsilon$  – пористость;

$c_p$  - удельная теплоемкость воздуха, заполняющего поры,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Распределенная энергетика в России: потенциал развития. Энергетический центр Московской школы управления Сколково, 2018. – 87 с.
2. Федеральный закон от 23 ноября 2009 г. N 261-ФЗ (ред. от 27.12.2018 г.) "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" (с изм. и доп., вступ. в силу с 16.01.2019 г.): [принят Гос. Думой 11 ноября 2009 г.].
3. Федеральный закон от 27 июля 2010 г. N 190-ФЗ (ред. от 29.07.2018 г.) "О теплоснабжении": [принят Гос. Думой 9 июля 2010 г.].
4. Башмаков И.А., Мышак А.Д. Динамика потребления энергии и энергоемкости ВРП в регионах России. Езда с поднятым капотом // Энергосовет. – 2016. – №2. – С. 12-20.
5. Патент РФ 2575652. Отверждаемый пластилин Ключниковых / Ключников О.Р., Ключников Я.О., Ключников И.О., Ключникова В.С.; Заявл. 03.06.2014. Оpubл. 20.02.2016. Бюл. №5.
6. Шелгинский А.Я. / Энерготехнологические комплексы промышленных предприятий – уровень решения основных задач энергосбережения [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - №10 (122), октябрь 2010 г. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).
7. Распределенная энергетика. Альтернативное энергоснабжение удаленных изолированных территорий России [Электронный ресурс], февраль, 2019. – Режим доступа: <https://energy.hse.ru/distributed>.
8. Батенин В.М., Масленников В.М., Толчинский Л.С. / Энерготехнологические комплексы - перспективный путь освоения топливных ресурсов [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - №04 (164). - 2014 г. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).
9. Михайлов С.А., Семенов В.Г. / Теплоснабжение Российской Федерации в цифрах [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - № 08, август 2002. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

10. Рыженков В.А., Прищепов А.Ф., Логинова Н.А., Кондратьев А.П. / О влиянии структурированного тонкопленочного теплоизоляционного покрытия на термическое сопротивление теплопроводов // Энергосбережение и водоподготовка. - 2010. - № 5 (67). - С. 58-59.

11. Ковалевский В.Б., Петухов В.С. Техничко-экономические показатели теплоизолированных труб для тепловых сетей бесканальной прокладки // Новости теплоснабжения. – 2003. - №6(34). – С. 18-26.

12. Башмаков И.А. / Анализ основных тенденций развития систем теплоснабжения России [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - №2 (90), - 2008. – Режим доступа: <http://www.ntsni.ru/>.

13. Актуальные проблемы в тепловых сетях и пути их решения («Альфа-Тех» (г. Санкт-Петербург)) / Энергетика. Энергосбережение. Экология. - 2008, декабрь, приложение, - с. 120.

14. Социально-экономическое положение Республики Татарстан. Комплексный информационно-аналитический доклад. Коммунальное хозяйство. Теплоснабжение. Январь-март 2018. - №3. – С. 1-3.

15. Ливчак В.И. / Совершенствование систем централизованного теплоснабжения крупных городов России [Электронный ресурс] // Журнал АВОК. - №5. - 2004. – Режим доступа: [www.abok.ru](http://www.abok.ru).

16. Алимов Х.А. / Тепловые сети. Актуальные проблемы и пути решения // Новости теплоснабжения. – 2007. - № 11. - С. 48-51.

17. Энергетическая стратегия России на до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715р.

18. Грунтович Н.В., Токочакова Н.В. (ГГТУ Гомель (Беларусь)) / Снижение потерь тепловой энергии на основе оптимизации выбора тепловой изоляции // Актуальные проблемы электроэнергетики: Юбилейный том, посвященный 100-летию со дня рождения В.И. Плескова. Н. Новгород: НГТУ. – 2008. - С. 125-128. - 2 табл.

19. Байбаков С.А., Тимошкин А.С. / Методики определения и оценки фактических тепловых потерь через изоляцию в водяных тепловых сетях систем централизованного теплоснабжения без отключения потребителей [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. – 2009. - №5 (105). – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

20. Хромченков В.Г., Иванов Г.В., Хромченкова Е.В. – Определение потерь тепла в тепловых сетях [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - 2006. - №06 (70). – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

21. Гурьев В.В. Тепловая изоляция в промышленности. Теория и расчет / Гурьев В.В., Жолудов В.С., Петров-Денисов В.Г. – М.: Стройиздат, 2003. – 416 с., ил.

22. Строительные нормы и правила: СНиП 41-02-2003. Тепловые сети [Текст]: нормативно-технический материал. Введ. 01.09.2003. – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.

23. Кузнецов Г.Ф. и др. Тепловая изоляция. 4-е изд. - М.: Стройиздат, 1985. - 421 с.

24. Справочник по композиционным материалам. Кн. 1. Под ред. Дж. Любина. - М.: Машиностроение, 1988. - 448 с.

25. Бобров Ю.Л. и др. Теплоизоляционные материалы и конструкции. - М.: Издательство Инфра-М, 2010. - 272 с.

26. Беляйкина И.В., Витальев В.П., Громов Н.К. и др. Под ред. Громова Н.К., Шубина Е.П. Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 376 с.

27. В.М. Копко. Теплоизоляция трубопроводов теплосетей: Учеб.-метод. пособие. - Минск: Технопринт, 2002. - 160 с.: ил.

28. Строительные нормы и правила: СНиП 2.04.07-86\*. Тепловые сети [Текст]: нормативно-технический материал. Введ. 01.01.1988, оконч. 01.09.2003. Минстрой России – М.: ГП ЦПП, 1994.

29. Строительные нормы и правила: СНиП 2.04.14-88. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов [Текст]: нормативно-технический мате-

риал. Введ. 01.01.1990, оконч. 01.11.2003. Госстрой России – М.: ГУП ЦПП, 1998.

30. Современные строительные товары. Справочник. — М: Росстройкомплект, 1998. – 704 с.

31. Строительные материалы: учебник для вузов / Под редакцией В.Г. Микульского. - М: АСВ, 2000. – 536 с.: ил.

32. Baustoffkenntnis/begr. Von Whilhelm Scholz. Unter Mitarb. Von Heinrich Bruckner.- 14, neubearb. Und erw.Aufl. -Duesseldorf: Werner, 1999.

33. Шойхет Б. М., Ставрицкая Л. В., Ковылянский Я. А. / Тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей. Современные материалы и технические решения // Энергосбережение. - №5. - 2002. – С. 43-45.

34. Пащенко Е. И. / Анализ причин снижения ресурса тепловых сетей [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - № 12(28). - 2002. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

35. Гафаров А.Х. / Анализ эффективной и надежной работы системы теплоснабжения [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - №5. - 2003. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

36. Методические указания по составлению энергетических характеристик для систем транспорта тепловой энергии. СПО ОРГРЭС, 1999.

37. Технические условия: ТУ 5870-01-001-263231-99. Полистирольная смесь.

38. Иванов В. В., Букаров Н. В., Василенко В. В. / Влияние увлажнения изоляции и грунта на тепловые потери подземных теплотрасс [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - № 7(23). - 2002. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

39. Технические условия: ТУ 2254-215-0576111. Пенопласт ППУ.

40. Майзель И.Л., Петров-Денисов В.Г. / Еще раз об экономической и технической целесообразности применения трубопроводов с индустриальной пенополиуретановой изоляцией для теплоснабжения [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. - №3. - 2003. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

41. Теплоизоляционный состав патент РФ №2098379, 1997.
42. Логинова Н.А. Определение эффективности тонкопленочных теплоизоляционных покрытий применительно к системам теплоснабжения [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. Наук (05.14.04) – Москва, 2010. - 20 с.
43. Низина Т.А., Инин А.Е. / Энергоэффективные жидкие теплоизоляционные покрытия на основе полых микросфер и тонкодисперсных минеральных наполнителей // Региональная архитектура и строительство. – 2015. - №4. - С. 33-41.
44. Ширинян В.Т. / Поход жидко-керамического «супертеплоизоляционного» покрытия «Thermal-Coat» по тепловым сетям России (Аналитический обзор) // Теплоэнергоэффективные технологии. – 2007. - №1. - С. 51-56, 75, 77, 2 табл.
45. Ширинян В.Т. / Поход жидко-керамического «супертеплоизоляционного» покрытия «Thermal-Coat» по тепловым сетям России // Новости теплоснабжения. – 2007. - № 9. - С. 46-51.
46. Кудряшов А.Н., Шкуринский Н.И., Елманов А.В. / Сравнение теплоизоляционных свойств минераловатной тепловой изоляции с жидкокерамическими покрытиями // Энергетика: управление, качество и эффективность использования энергоресурсов. - С. 354-357.
47. Ильин Р.А. / Оценка тепловых потерь в тепловых сетях при применении жидкокристаллической изоляции // Теплоэнергетика. – 2015. - №7. - С. 76-80.
48. Ильин Р.А., Фокин В.М. / Энергосбережение в тепловых сетях при теплоснабжении потребителей // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. - №2 (94). - С. 43-45.
49. Петров-Денисов В.Г., Скрябин С.А., Сладков А.В. / Расчетный метод определения теплопроводности композиционного материала с повышенными теплоизолирующими свойствами // Промышленное и гражданское строительство. - 2004. - №4. – С. 20-21.

50. Ключников О.Р., Галимуллин Р.Р., Ключников И.О. // Сравнение значений сопротивления теплопередаче ряда жидкокерамических покрытий, пенополиэтилена и гипса // Сб. тез. докл. и сообщ. на XIII Международном симпозиуме «Энергоэффективность и энергосбережение» - Казань, 2013. - С. 497-498.

51. Логинова Н.А., Григорьев С.В., Лапин Е.Е., Погорелов С.И., Рыженков А.В. / Выбор и оптимизация соотношения компонентов для разработки быстромонтируемых термостойких теплоизоляционных конструкций // Теплоэнергетика. – 2016. - №5. - С. 51-55.

52. Логинова Н.А., Рыженков А.В., Прищепов А.Ф., Лапин Е.Е., Плещева А.Ю. / Испытания тонкопленочных многослойных теплоизоляционных покрытий на морозостойкость // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. - №2 (25). - С. 23-25.

53. Рыженков В.А., Логинова Н.А., Прищепов А.Ф. / Эффективность тонкопленочных покрытий при использовании микросфер для систем теплоснабжения // Надежность и безопасность энергетики. – 2012. - №2 (17). - С. 61-63.

54. Рыженков В.А., Логинова Н.А., Прищепов А.Ф., Бычков А.И. // О влиянии связующего вещества на механические и теплофизические характеристики тонкопленочных теплоизоляционных покрытий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. - №5 (79). - С. 29-31.

55. Бухмиров В.В., Гаськов А.К. / Применение тонкопленочных покрытий в целях энергосбережения // Вестник ИГЭУ, вып. 5. – 2015. - С. 1-7

56. Бухмиров В.В., Гаськов А.К. / Исследование энергетической эффективности покрытий для утепления зданий // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. - №8. - С. 7-11.

57. Щелоков А.И., Краснова Н.П., Мжельская О.Ю. / Снижение тепловых потерь за счет внедрения нового вида теплоизоляционного материала // Инфраструктурные отрасли экономики, Проблемы энерго-, ресурсосбережения и повышения энергоэффективности. - С. 158-162.

58. Шойхет Б. М. / Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов. Современное состояние и перспективы развития [Электронный ресурс] // Энергосбережение. - 2005. - №10. – Режим доступа <http://www.abok.ru>.

59. Строительные нормы и правила: СНиП 41-03-2003. Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов [Текст]: нормативно-технический материал. Введ. 01.11.2003. – М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004.

60. Свод правил: СП 41-103-2000. Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов [Текст]: нормативно-технический материал. Введ. 01.01.2013. – М.: Минрегион России, 2012.

61. Ставрицкая Л.В. / Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. (ОАО «Теплопроект», г. Москва) // Новости теплоснабжения. – 2005. - №8. - С. 37-44, 46 Рус.

62. Канев С.Н., Ивашкевич А.А. / Расчет тепловых потерь в системах теплоснабжения // Ученые заметки ТОГУ. – 2013. - Том 4, - №4. - С. 1785-1798.

63. Бадах В.Ф., Кузнецова А.Д. / Расчет нормативных потерь тепла через изоляцию трубопроводов тепловых сетей // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2011. - №4 (18). - С. 60-72.

64. Семенов В.Г. / Определение фактических тепловых потерь через теплоизоляцию в сетях централизованного теплоснабжения [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. – 2003. - №4. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).

65. Аверьянова О.В. / Энергосбережение в тепловых сетях за счет параметров теплоносителя // Инженерно-строительный журнал. – 2009. - №5, - С. 43-46.

66. Петрикеева Н.А., Черемисин А.В., Копытин А.В. / Задача технико-экономической оптимизации при определении толщины теплоизоляционного слоя тепловых сетей // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. – 2016. - №1 (41). - С. 21-28.

67. Цыганкова Ю.С. / Экспресс-оценка потерь тепловой энергии в сетях теплоснабжения // Проблемы энергетики. – 2014. - № 5-6. - С. 23-28.

68. Васильев А.Ф., Наумов Д.А. Рекомендации по применению теплоизоляционных материалов и конструкций для трубопроводов и емкостей // Новости теплоснабжения. – 2001. - №9. – С. 41-48.

69. Раппопорт Я., Шмелев А, Барановский М. / Тепловые сети: ждать нельзя модернизировать // Полимерные трубы. - 2011. - №2(32). – С. 16-17.

70. Кочергин С.М. Теплоизоляция. Материалы, конструкции, технологии: Справ. пособие. – М.: Стройинформ, 2008. – 440 с.

71. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. / Анализ тепловых потерь трубопроводов в условиях увлажнения изоляции с учетом процесса испарения влаги // Известия Томского политехнического университета. – 2008. - Т. 313. - №4. - С. 8-88.

72. Немова Т.Н., Лежнева Ю.А., Цветков Н.А., Алексеева Е.Г. / Влияние изменения теплопроводности теплоизоляционных материалов на тепловые потери магистральных трубопроводов // Вестник Томского гос. Архитектурно-строит. унив. - 2016. - №5. – С. 151-160.

73. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. / Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов // Энергосбережение. -2002. -№3. – С. 60-62.

74. Кузнецов Г.В., Половников В.Ю. / Тепловые потери подземных канальных теплопроводов в условиях деформации слоя тепловой изоляции с учетом радиационного теплообмена в полости канала // Инженерно-строительный журнал. - 2012. - №2(28). - С. 2-7.

75. Базукова Э.Р., Ваньков Ю.В. / Тепловые потери паропроводов при ухудшении свойств изоляции в процессе эксплуатации [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона. - 2015. - №3. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3249>.

76. Ветрова Г. / Вентфасады: типичные ошибки при устройстве и проектировании фасадов с минераловатными утеплителями // Кровельные изоляционные материалы. – 2015, – №2. – С. 24-26.

77. Ярцев В.П., Мамонтов А.А., Мамонтов С.А. / Эксплуатационные свойства и долговечность теплоизоляционных материалов (минеральной ваты и пенополистирола) // Кровельные и изоляционные материалы. – 2013, – №1. – С. 8-11.

78. Шойхет Б.М., Ставрицкая Л.В. / Обследование технического состояния и реконструкция тепловой изоляции эксплуатируемых магистральных теплопроводов // Энергосбережение. - 2002. - №3. – С. 60-62.

79. Смородова О.В. / Инструментальная оценка динамики старения минераловатной тепловой изоляции // Инновационная наука. – 2016, – №7-8. – С. 90-93.

80. Смородова О.В. / Динамика теплозащитных свойств минераловатной тепловой изоляции со временем эксплуатации [Электронный ресурс] // Научно-практический электронный журнал Аллея Науки. – 2017. - №9. – Режим доступа: [www.Alley-science.ru](http://www.Alley-science.ru).

81. Васильев А.Ф., Наумов Д.А. /Рекомендации по применению теплоизоляционных материалов и конструкций для трубопроводов, оборудования и емкостей // Новости теплоснабжения. – 2001, – № 9(13). – С. 41-48.

82. Фетисов В.В., Жеглова Е.Л., Крупинина О.А. / Результаты контроля теплопроводности минераловатных плит для московского строительства в 2014 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ceiis.mos.ru/>.

83. Половников В.Ю., Рахимова Ю.Н. /Численный анализ тепловых потерь теплопроводов в условиях деформации и нарушения целостности слоя тепловой изоляции // Теплофизические основы энергетических технологий: II Всероссийская научно-практическая конференция с международным участием, 06 – 08 октября 2011 г. : сб. науч. трудов. – Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - 2011 – С. 296-300.

84. Половников В.Ю., Ярошенко Р.С. /Исследование проницаемости волокнистых теплоизоляционных материалов // Издательство ТПУ: Труды II Всероссийской научно-практической конференции. Теплофизические основы энергетических технологий. - 2011. – С. 300-303.

85. Кузнецов В.Г., Озерова И.П., Половников В.Ю., Цыганкова Ю.С. / Оценка фактических потерь тепла при транспортировке теплоносителя с учетом технического состояния и реальных условий эксплуатации тепловых сетей // Известия томского политехнического университета – 2011. – Т.319 – №4. – С.56-60.

86. Шойхет Б.М. / Нормы и правила проектирования теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей [Электронный ресурс] // - 2015, - №1. - С. 66-67. – Режим доступа: [www.avoknw.ru](http://www.avoknw.ru).

87. Некрасов А.С., Синяк Ю.В., Воронина С.А. / Перспективы развития теплоснабжения России // Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского гуманитарного научного фонда (проект № 08-02-00431а). - С. 37-54.

88. Централизованное теплоснабжение России / материал основан на результатах работы ряда научных институтов (ИНИИ им. Кржижановского, ВТИ и др.) по разработке «Программы модернизации электроэнергетики России на период до 2020 г.» по заказу Министерства энергетики РФ [Электронный ресурс] // Промышленные и отопительные котельные и мини-ТЭЦ. – 2012. - №4 (14). - Режим доступа: [http://aqua-therm.ru/articles/articles\\_246.html](http://aqua-therm.ru/articles/articles_246.html).

89. Чернов С.С., Кулак Е.Ф. / Анализ энергоэффективности систем теплоснабжения города Новосибирска и разработка предложения по ее повышению // Инновационный потенциал российских регионов. С. 45-58.

90. Слепченко В.С., Петраков Г.П. / Повышение энергоэффективности теплоизоляции трубопроводов тепловых сетей северных и северо-восточных регионов России // Инженерно-строительный журнал. – 2011. - №4. - С. 28-55.

91. Малышева А.В., Чернявская Я.В., Попов В.Г. / Оптимизация технологии теплогидроизоляции трубопроводов // Инженерно-строительный журнал. – 2010. - №3. - С. 15-17.

92. Систер В.Г., Иванникова Е.М., Поливода Ф.А. / Методы исследования и технические решения энергоэффективных тепловых сетей // Энергосбережение и водоподготовка. – 2012. - №2 (76). - С. 8-11.

93. Ключников, О.Р. Закирова И.А. / Защитное покрытие на основе этилен-пропилен-диеновых эластомеров холодной вулканизации для локального ремонта гидро- и электроизоляции // Энергетика Татарстана. - 2010. - № 4. - С. 21-24.

94. Ключников, О.Р., Закирова И.А. / О влиянии внешнего тонкого резинового покрытия на изменение плотности тепловых потоков через теплоизоляцию трубопроводов // Энергетика Татарстана. - 2011. - №3. - С. 65 – 66.

95. Кнунянц, И.Л. Химический Энциклопедический Словарь / И. Л. Кнунянц // М.: Советская энциклопедия. – 1983. – 792 с.

96. Закирова И.А., Ключников, О.Р. / Энергосберегающие свойства и термостабильность наружного тонкопленочного покрытия теплоизоляции на основе каучука СКЭПТ-ЭНБ холодной вулканизации. // Проблемы энергетики. - 2013. - №1-2. - С. 73-76.

97. Влияние теплового старения на свойства этиленпропилендиенового каучука. Thermal ageing effects on the properties of ethylene-propylene-diene monomer (EPDM). Bouguedad Diaffar, Mekhaldi Abdelouahab, Boubakeur Ahmed, Jbara Omar. Ann. Chim. Sci. mater. - 2008. – 33. - №4. - С. 303-313.

98. Материалы на основе этиленпропилендиенового каучука, стойкие к воздействию горячей воды и горячего воздуха. Часть 1. Термостойкость по воздушной среде. High Performance Werkstoffe aus EPDM fur den Einsatz in (Heib-) Wasser und Heibdampf. Teil 1. Hitzebestandigkeit in Luft. Peterseim V., Turck F., Reibesell C. Kautsch und Gummi. Kunstst. - 2009. – 62. - № 1-2. С. 44-49.

99. Тройной этиленпропиленовый каучук. EPDM. Eur. Chem. News. - 2005. – 82. - №2137. - С. 18.

100. ООО «Рибerra» / Высокоэффективная техническая изоляция К-Флекс для энергетики и ЖКХ // Энергетика Татарстана. - 2010. - №1. - С. 90-91.

101. Nield D.A. / Convection in porous media. 3rd ed. // D.A. Nield, A. Bejan. N.Y./ Springer-Verlag. - 2006. – 640 с.
102. Ушков Ф.В. Теплопередача ограждающих конструкций при фильтрации воздуха. – М.: Стройиздат, 1969. – 144 с.
103. Садыков Р.А. / Теория процессов стационарного нелинейного переноса с учетом фильтрации воздуха, конденсации или испарения парообразной влаги // Известия КГАСУ. – 2011. - №3 (17). - С. 268-276.
104. Vasseur P., Hung Nguen T., Robillard L., Tong Thi V.K. / Natural convection between horizontal concentric cylinders filled with a porous layer with internal heat generation // Int. J. Heat Mass Transfer. - 1984. - Vol. 27. - №3, - pp. 337-349.
105. Сираев Р.Р., Якушин В.И. / Конвекция и теплообмен в горизонтальном цилиндрическом слое насыщенной пористой среды с внутренними источниками тепла // Труды Четвертой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ-4). Материалы конференции / М.: Издательский дом МЭИ. - 2006. - Т.6. - С. 117-120.
106. Трифонова Т.А., Шеремет М.А. / Численные исследования нестационарных режимов сопряженной естественной конвекции в пористой цилиндрической области (модель Дарси-Буссинеска) // Компьютерные исследования и моделирование. - 2013. - Т. 5. - № 2. - С. 179-191.
107. Половников В.Ю. / Анализ тепловых режимов однетрубных теплопроводов с учетом конвективного движения воздуха в полости канала // Известия Томского политехнического университета. - 2010. - Т. 317 - № 4. - С. 33-37.
108. Половников В.Ю. / Математическое моделирование тепловых режимов систем транспортировки тепла // Сборник научных статей. Современная наука. – 2012. - №2 (10). - С. 118-122.
109. Джалурия Й. Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

110. Жукаускас А., Жюгжда И. Теплоотдача цилиндра в поперечном потоке жидкости. Вильнюс. Мокслас. 1979. – 240 с.
111. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов, Изд. 3-е, перераб. и доп. М., Энергия, 1975. – 488 с.
112. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. – 344 с.
113. Шлихтинг Г. Терия пограничного слоя. М.: Наука, 1974. – 712 с.
114. Солодов А.П. Электронный курс тепломассообмена. – Режим доступа: [http://twt.mpei.ac.ru/solodov/hmt-ebook\\_2009/HMT\\_E-Book](http://twt.mpei.ac.ru/solodov/hmt-ebook_2009/HMT_E-Book).
115. Арсеньев Ю.Н., Белоусов В.П., Дранченко А.А. и др. Тепловое оборудование и тепловые сети: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 400 с.
116. Галин Н.М., Кириллов Л.П. Тепломассообмен (в ядерной энергетике): Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 376 с.
117. Михеев М.А. Основы теплопередачи: учебник для энергетических и электроэнергетических факультетов вузов. – М-Л: Гос. энергетическое изд-во, 1956. – С. 392.
118. Королев Г.Л. / Стационарное вязкое обтекание эллиптического цилиндра до чисел Рейнольдса 900 // Ученые записки ЦАГИ. - 2012. - Т. XLIII. - №5. - С. 46-59.
119. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1986.
120. Effects of reynolds number and a low-intensity reestream turbulence on the flow around a circular cylinder. Christoffer Norberg. Göteborg, Maj, 1987.
121. Numerical study of the flow over a circular cylinder in the near wake at Reynolds number 3900. Y. M. Shim<sup>1</sup>, Rajnish N. Sharma<sup>2</sup>, and P. J. Richards<sup>3</sup>. The University of Auckland, Auckland 1142, New Zealand. 39th AIAA Fluid Dynamics Conference, 22 - 25 June 2009, San Antonio, Texas, - p. 1-13.
122. Брайловская В.А., Петражицкий Г.Б., Полежаев В.И. / Естественная конвекция и перенос тепла в пористых прослойках между

горизонтальными коаксиальными цилиндрами // ПМТФ. – 1978. - № 6. - С. 90-96.

123. Брайловская В.А., Петражицкий Г.Б. / Тепловая и ламинарная конвекция жидкости в кольцевой области при заданном потоке тепла // ПМТФ. – 1977. - №3. – С. 109-114.

124. Бессонов О.А., Брайловская В.А., Никитин С.А., Полежаев В.И. / Тест для численных решений трехмерной задачи о естественной конвекции в кубической полости // Матем. Моделирование. – 1999. - Т. 11. - №12. - С. 51-58.

125. Бессонов О.А., Брайловская В.А. / Пространственная модель тепловой конвекции в зазоре между горизонтальными коаксиальными цилиндрами с анизотропным пористым заполнением // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. - 2001. - № 1. - С. 145-155.

126. Трофимова А.В., Цибулин В.Г. / Конвективные движения в пористом кольцевом секторе // Прикладная механика и техническая физика. - 2011. - Т. 52. - № 3. - С.116-125.

127. ИТС-1 Измеритель теплопроводности. Руководство по эксплуатации. ИТСМ.001.00.РЭ.

128. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учебное пособие / Н.С. Кравченко, О.Г. Ревинская; Национальный исследовательский томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 88 с.

129. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А.Г. Коротких; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.

130. Блох А.Г. Теплообмен излучением: Справочник / А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

131. Шейндлин А.Е. Излучательные свойства твердых материалов / Под общ. ред. А.Е. Шейндлина. М.: Энергия, 1974. – 472 с.

132. Осипова В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена: Учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 320 с., ил.

133. Спэрроу Э.М. Теплообмен излучением / Э.М. Спэрроу, Р.Д. Сесс. Перевод с англ. С.З. Сориц и Л.М. Сорокопуда. Под ред. А.Г. Блоха. – Л.: Энергия, 1971. – 296 с.

134. Радиометр неселективный «Аргус-03». Паспорт, техническое описание и инструкция по эксплуатации.

135. Архипов В.А., Жарова И.К., Татаринцева О.С., Кузнецов В.Т., Гольдин В.Д. / Измерение коэффициента излучения поверхности конструкционных и теплоизоляционных материалов // Ползуновский вестник. – 2010. - №4-1. – С. 233-236.

136. Измерители давления многофункциональные. ПРОМА-ИДМ, ПРОМА-ИДМ-4х, ПРОМА-ИДМ(В), ПРОМА-ИДМ(В)-4х. Руководство по эксплуатации В407.020.000.000-05 РЭ.

137. Андрианов К.А. Строительная физика: метод. указ. / сост.: Андрианов К.А., Матвеева И.В., Макаров А.М. – Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2007. – 64 с.

138. Половников В.Ю., Ярошенко Р.С. / Исследование проницаемости волокнистых теплоизоляционных материалов // Издательство ТПУ: Труды II Всероссийской научно-практической конференции. Теплофизические основы энергетических технологий. – 2011. – С. 300-303.

139. ГОСТ 25380-82. Здания и сооружения. Метод измерения плотности тепловых потоков, проходящих через ограждающие конструкции [Текст]. – Введ. 01.01.1983. – М.: Издательство стандартов, 1988.

140. Измеритель теплофизических величин ТЕПЛОГРАФ. Руководство по эксплуатации НК ИП.408131.100 РЭ.

141. ГОСТ 26254-84. Здания и сооружения. Методы определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций [Текст]. – Введ. 01.01.1985. – М.: Издательство стандартов, 1994.

142. ГОСТ 10704-91. Трубы стальные электросварные прямошовные [Текст]. – Введ. 01.01.1993. – М.: Стандартиформ, 2007.

143. Результаты контроля теплопроводности минераловатных плит для московского строительства в 2014 году [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ceiis.mos.ru/presscenter/news/detail/1659565.html>.

144. Постановление государственного комитета Российской Федерации по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству от 27.09.2003 г. № 170 «Об утверждении правил и норм технической эксплуатации жилищного фонда» / Законодательные и нормативные документы в жилищно-коммунальном хозяйстве, №11, ноябрь, 2003.

145. Строительные нормы и правила: СНиП 23-01-99. Строительная климатология. [Текст]: нормативно-технический материал. Введ. 01.01.2000. – М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003.

146. Румянцев А.В. Метод конечных элементов в задачах теплопроводности: Учебное пособие / Калинингр. ун-т. Калининград, 1995. – 170 с.

147. Жуков Н.П., Майникова Н.Ф., Никулин С.С., Антонов А.О. Решение задач теплопроводности методом конечных элементов: учебное пособие / Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2014. – 80 с.

148. Макарьянц Г.М., Прокофьевы А.Б. Основы метода конечных элементов: учебное пособие / Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. – 80 с.

149. Дворецкий С.И., Ермаков А.А., Иванов О.О., Акулинин Е.И. Компьютерное моделирование процессов и аппаратов пищевой, био- и химической технологии в среде FlexPDE: Учеб. пособие / Тамбов: Изд-во Тамб. гос. тех. ун-та, - 2006. - 72 с.

150. Маслов Ю.А., Меринов И.Г., Рябов Н.О. Моделирование теплогидравлических процессов в реакторных установках и элементах теплообменного оборудования ЯЭУ: лабораторный практикум. –М.: МИФИ, 2008. - 156 с.

151. Данилов О.Л., Костюченко П.А. Практическое пособие по выбору и разработке энергосберегающих проектов. – 2006. – 668 с.
152. Клименко В.А., Егорова А.И., Дмитров С.В. / Технико-экономический анализ систем теплоснабжения [Электронный ресурс] // Новости теплоснабжения. – 2005. - №6. – Режим доступа: [www.ntsni.ru](http://www.ntsni.ru).
153. Руководящий документ: РД.34.01-00. Методика проведения энергетических обследований (энергоаудита) бюджетных учреждений, Нижний Новгород, 2000. – 194 с.
154. ГОСТ 25314-82. Межгосударственный стандарт. Контроль неразрушающий, тепловой. Термины и определения. [Текст]. – Введ. 01.01.1983. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2005.
155. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. 2-е изд. М.: Издательский дом «Спектр», 2013. - 575 с.
156. Руководящий документ: РД 153-34.0-20.364-00. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования. РАО «ЕЭС РОССИИ», 2000. - 50 с.
157. ГОСТ 26629-85. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций [Текст]. – Введ. 01.07.1986. – М.: Издательство стандартов, 1986.
158. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. 7-е изд. М.: Издательство МЭИ, 2001. - 472 с.
159. Силаев Д.А. / ППУ и ППИМ изоляции. Взгляд с другой стороны // Новости теплоснабжения. - 2009. - №7. – С. 32-36.
160. Сосунов Е. / О преимуществах пеностекла в сравнении с другими теплоизоляционными материалами // Стекло мира. - 2009. - №1. – С. 82-88.
161. Чепулис А.В., Шойхет Б.М. / Развитие теплоизоляционной отрасли российской экономики // Кровельные и изоляционные материалы. - 2007. - №1. – С. 20-21.

162. Шойхет Б., Ставрицкая Л., Ковылянский Я. / Тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей // ЖКХ: технология и оборудование. - 2007. - №3. – С. 40-43.
163. Лукьянцев М. / Теплоизоляция для внутренних инженерных систем // Аква – Терм. - 2007. - №3. – С. 14-16.
164. Русин С.П. О методах определения теплофизических свойств дисперсных тепло- и огнезащитных материалов при воздействии высокоинтенсивных энергетических потоков. Физика экстремальных состояний вещества. – 2007: Сборник и др. Черногоровка: ИПХФ РАН. – 2007. – С. 90-92.
165. Khanafer K., Al-Amiri A., Pop I./ Numerical analysis of natural convection heat transfer in a horizontal annulus partially filled with a fluid-saturated porous substrate // International Journal of Heat and Transfer, 51, 2008, pp. 1613-1627.
166. Титаренко Н.Н., Дворников П.А., Ковтун С.Н., Павлов А.В., Рощин Н.Г., Матвеев Е.Л. / Определение параметров проницаемости волокнистых пористых материалов // Известия вузов. Ядерная энергетика. - №3. - 2012. - С. 155-163.
167. Caltagirone J.-P. / Thermoconvective instabilities in a porous medium bounded by two concentric horizontal cylinders // J. Fluid Mech. - 1976, - vol. 76, - part 2, - pp. 337-362.
168. Rao Y.-F., Miki Y., Fukuda K., Takata Y., Hasegawa S. / Flow patterns of natural convection in horizontal cylindrical annuli // J. Heat Mass Transfer. - 1985, - vol. 28, - №3, - pp. 705-714.
169. Kumari M., Nath G. / Non-Darcy mixed convection boundary layer flow on a vertical cylinder in a saturated porous medium // J. Heat Mass Transfer. - 1989, - vol. 32, - №1, - pp. 183-187.
170. Charrier-Mojtabi M. C. / Numerical and experimental study of multicellular free convection flows in an annular porous layer // J. Heat Mass Transfer. - 1991, - vol. 34, - №12, - pp. 3061-3074.

171. Khashan S.A., Al-Amiri A.M., Pop I. / Numerical simulation of natural convection heat transfer in a porous cavity heated from below using a non-Darcian and thermal non-equilibrium model // International Journal of Heat and Transfer, - 49, - 2006, - pp. 1039-1049.

172. Kumari M., Nath G. / Unsteady natural convection from a horizontal annulus filled with a porous medium // International Journal of Heat and Transfer, - 51, - 2008, - pp. 5001-5007.

173. Схема теплоснабжения Осиновского СП Зеленодольского муниципального района РТ до 2035 года (актуализация на 2018 г.). Обосновывающие материалы. Казань, 2017. - 234 с.

174. Методические указания по определению расходов топлива, электроэнергии и воды на выработку теплоты отопительными котельными коммунальных теплоэнергетических предприятий (издание 4-е) Одобрено Научно-техническим советом Центра энергоресурсосбережения Госстроя России (протокол №5 от 12.07.2002 г.). ГУП Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, 2002. – 235 с.

Таблица 1. Классификация современных, наиболее распространенных теплоизоляционных материалов

| Наименование      | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К) | Водопоглощение за 24 часа | Средний предел прочности при сжатии, МПа | Максимальная температура применения, °С | Недостатки   | Достоинства   | Область применения  | Литература           |
|-------------------|------------------------------|--|---------------------------|--|---|--|---|---|----------------------|
| Минеральные ваты  |                              |  |                           |  |   |  |   |   |                      |
| Плита             | 34-400                       | 0,033-0,058                            | 3% по объему              | 0,001-0,15                               | 300-700                                 | потеря теплоизоляционных свойств при намокании, содержит в составе вредные компоненты, минеральные волокна и связывающие смолы                       | высокая термоустойчивость, огнестойкость, паропроницаемость, биологическая и химическая стойкость, негигроскопичность | тепловая изоляция промышленного оборудования, трубопроводов, строительных конструкций                 | [23, 25,26, 32, 158] |
| Полужесткая плита | 34-135                       | 0,035-0,042                            | 5% по объему              | 0,005-0,013                              | 300-700                                 | то же  | то же   | то же   | [23, 25,26, 32, 158] |
| Базальтовые ваты  | 40-100                       | 0,035-0,042                            | 3% по объему              |  | 500-700                                 | ломкость, повышается теплопроводность при увлажнении, в состав волокон входит смола, в составе частички стекла, вызывающие зуд при попадании на кожу | долговечность, паропроницаемость, высокая прочность, не поддается деформации, огнестойкость                           | теплоизоляция теплопроводов, ограждающих конструкций, звукоизоляция помещений, противопожарная защита | [23, 25,26, 32, 158] |
| Каолиновая вата   | 80                           | 0,15-0,30                              | 3% по объему              |  | 1100                                    |  | высокая термостойкость,   | изоляция энергетического  | [23,25, 26,32,       |

|   |         |             |              |             |      |  |   |  |                         |
|---|---------|-------------|--------------|-------------|------|--|---|--|-------------------------|
|   |         |             |              |             |      |  | высокая химическая стойкость, небольшая плотность, стойкость к термоударам, эластичность  | оборудования, трубопроводов, сводов или стен, различных видов печей  | 158]                    |
| Каолиновые плиты на глиняном связующем              | 250-500 | 0,130-0,175 | 3% по объему | 0,3-2,0     | 1200 |  | то же   | то же  | [23,25, 26,32, 158]     |
| Каолиновые плиты на глиняном связующем безобжиговые | 250-350 | 0,110-0,151 | 3% по объему | 0,3-0,8     | 1250 |  | то же   | то же  | [23,25, 26,32, 158]     |
| Стекловата и стекловолокно                          |         |             |              |             |      |  |   |  |                         |
| Жесткая плита                                       | 50-140  | 0,01-0,025  |              | 0,030-0,033 | 400  | небольшой срок эксплуатации, высокая ломкость волокна, необходимость соблюдения строгих мер предосторожности при работе с этим материалом, низкая температура эксплуатации | повышенная упругость, устойчивость к вибрации, высокая химическая стойкость, негигроскопичность, высокая паропроницаемость и водоотталкивающие свойства | теплоизоляция трубопроводов, звукоизоляция перегородок, утепление деревянных домов, металлоконструкций, кровли, фасада | [23, 24,25, 26,32, 158] |
| Плита   | 13-75   | 0,01-0,025  |              | 0,035-0,061 | 400  | то же  | то же   | то же  | [23, 24,25, 26,32, 158] |
| Мягкая плита  | 17-19   | 0,008-0,020 |              | 0,033-0,041 | 400  | то же  | то же   | то же  | [23, 24,25, 26,32,      |

|                         |         |             |              |             |     |   |  |  |                          |
|-------------------------|---------|-------------|--------------|-------------|-----|---|--|--|--------------------------|
|                         |         |             |              |             |     |   |  |  | 158]                     |
| Мягкий мат              | 11-35   | 0,008-0,025 |              | 0,033-0,061 | 400 | то же   | то же  | то же  | [23, 24,25, 26,32, 158]  |
| Стекловата              | 25      | 0,010-0,45  |              | 0,047       | 400 | то же   | то же  | то же  | [23, 24,25, 26,32, 158]  |
| Стекловолокно           | 60-80   | 0,040-0,042 |              |             | 200 | то же   | то же  | теплоизоляция трубопроводов, ограждающих конструкций, изоляторов в электротехническом производстве, химической и нефтегазовой промышленности | [23, 24,25, 26,32, 158]  |
| Легкие бетоны           |         |             |              |             |     |   |  |  |                          |
| Пенобетон               | 200-400 | 0,05-0,14   | 14% от массы | 0,7-2,5     | 150 | низкая прочность на изгиб, неточность размеров            | огнестойкость, низкая влагонасыщаемость                            | теплоизоляция промышленного оборудования и строительных конструкций  | [23,25, 26,32, 158, 162] |
| Ячеистый бетон          | 200-500 | 0,01-0,15   | 5% от массы  | 0,3-2,5     | 150 |   | паропроницаемость, огнестойкость                                   | то же  | [23,25, 26,32, 158, 162] |
| Пенобетон неавтоклавный | 500     | 0,05        | 10% от массы |             | 150 | высокий уровень водопоглощения, низкая прочность на изгиб | огнестойкость, прочность, морозостойкость, биологическая стойкость | то же  | [23,25, 26,32, 158, 162] |
| Газобетон               | 300-500 | 0,093-0,127 | 5% от массы  | 0,4-1,2     | 200 | высокий уровень водопоглощения, низкая прочность на изгиб | огнеупорность, точность соблюдения размеров                        | то же  | [23,25, 26,32, 158, 162] |

|                                       |         |            |               |         |      |  |  |   |                                |
|---------------------------------------|---------|------------|---------------|---------|------|--|--|---|--------------------------------|
| Армопенобетон                         | 350-450 | 0,08-0,16  | 14% от массы  | 1,0-2,5 | 150  |  | защита металлических труб от внешней коррозии, высокая прочность на сжатие   | тепловая изоляция трубопроводов   | [23,25, 26,32, 158, 162]       |
| Пористые комбинированные              |         |            |               |         |      |  |  |   |                                |
| Пенополимербетон (пенополимерминерал) | 400     | 0,07       | 5% по объему  | 0,8     | 150  | высокие показатели по объемной массе                         | высокая теплостойкость, механическая прочность, ремонтпригодность, не требует дополнительной гидроизоляция, антикоррозионная защита, длительный срок службы, паропроницаемость | тепловая изоляция трубопроводов тепловых сетей и систем ГВС                             | [23, 25,26, 32, 158, 159, 162] |
| Вспученные минералы                   |         |            |               |         |      |  |  |   |                                |
| Вермикулит                            | 100-200 | 0,05-0,18  | 10% по объему |         | 1350 |  | высокая температуроустойчивость, огнестойкость, биологическая стойкость  | энергетика, металлургия, промышленность химическая, и лакокрасочная, автомобилестроение | [23,25, 26,32, 158, 164]       |
| Перлит                                | 75-500  | 0,046-0,08 | 10% по объему |         | 600  |  | гидрофобный, негорючий, хорошая звукоизоляция  | при ремонте изоляции теплопроводов, в строительстве                                     | [23,25, 26,32, 158]            |
| Пеностекло                            | 100-600 | 0,03-0,1   | 10% по объему | 0,5-7,5 | 1000 | отсутствует паропроводимость, очень хрупкий, тяжесть блоков, | отсутствие окисления, не подвержен эрозии, высокая   | теплоизоляция оборудования в атомной промышленности                                     | [23,25, 26,32, 158, 160]       |

|                                  |         |             |  |         |      |  |  |  |                     |
|----------------------------------|---------|-------------|--|---------|------|--|--|--|---------------------|
|                                  |         |             |  |         |      | плохо переносит ударные нагрузки                             | прочность, неизменность размеров, шумоизоляция, влагостойкость, длительный срок службы | и в энергетике, при строительстве высотных сооружений, в сооружениях связанных с водной средой                           |                     |
| Вспененные минералы              |         |             |  |         |      |  |  |  |                     |
| Шамотный ультралегковес ШЛБ-0,4  | 400     | 0,149       |  | 0,8-1,2 | 1700 |  | огнеупорный  | для частей рабочей зоны различных видов печей  | [23,25, 26,32, 158] |
| Диатомовый ультралегковес        | 500     | 0,116       |  | 0,6     | 900  |  | гигроскопичность   | для снижения толщины и массы стен и других ограждающих конструкций   | [23,25, 26,32, 158] |
| Пенодиатомовый ультралегковес    | 350-450 | 0,087-0,110 |  | 0,6-0,9 | 800  |  | огнеупорный, легкий материал   | в строительстве  | [23,25, 26,32, 158] |
| Древесные материалы              |         |             |  |         |      |  |  |  |                     |
| Древесно-волокнистые плиты (ДВП) | 230-270 | 0,040-0,045 |  | 0,4-2,0 | 90   | незначительная толщина листа ограничивает область применения | долговечность, легко поддается обработке   | в строительстве, вагоностроении, в производстве мебели, столярных изделий и конструкций                                  | [25, 32]            |
| Древесно-стружечные плиты (ДСП)  | 250-400 | 0,045-0,090 |  | 12      | 90   | токсичен, быстро изнашивается                                | водостойкость, форма и объем не изменяется   | в редких случаях как утеплитель, в строительстве, вагоностроении, в производстве мебели, столярных изделий и конструкций | [25, 32]            |

|                           |             |             |                     |           |     |  |  |  |                           |
|---------------------------|-------------|-------------|---------------------|-----------|-----|--|--|--|---------------------------|
| Арболит                   | 350         | 0,12        |                     | 0,5       | 90  | токсичен,<br>недостаточная<br>точность<br>геометрии  | повышенная<br>прочность на<br>изгиб,<br>звукоизоляция,<br>огнеупорный,<br>удобен для<br>обработки                            | теплоизоляция<br>трубопроводов и<br>ограждающих<br>конструкций   | [23,25,<br>26,32,<br>158] |
| Фибролит                  | 300-<br>350 | 0,10-0,11   |                     | 0,4-1,2   | 90  | при влажности<br>выше 35 % может<br>поражаться<br>домовым грибом   | не горит<br>открытым<br>пламенем, легко<br>обрабатывается,<br>хорошее<br>сцепление со<br>штукатуркой                         | для изоляции<br>стен и покрытий,<br>перегородок,<br>каркасных стен<br>и перекрытий<br>только в сухих<br>условиях | [23,25,<br>26,32,<br>158] |
| Торфяные<br>плиты и блоки | 150-<br>430 | 0,052-0,080 |                     | 0,3-1,7   | 90  | в увлажненном<br>состоянии могут<br>проявлять<br>склонность к<br>микробиологическ<br>ому<br>самовозгоранию | водостойкость,<br>биологическая<br>стойкость,<br>защита от<br>радиации   | для изоляции<br>паропроводов,<br>наружного<br>утепления<br>несущих и<br>ограждающих<br>конструкций               | [23,25,<br>26,32,<br>158] |
| Древесные материалы       |             |             |                     |           |     |  |  |  |                           |
| Пробковый<br>рулон        | 150         | 0,04        |                     |           | 120 |  | шумоизоляция,<br>водонепроницае<br>мость, не теряет<br>размеров при<br>изменении<br>параметров<br>температуры и<br>влажности | теплоизоляция<br>трубопроводов,<br>для утепления и<br>звукоизоляции  | [23,25,<br>26,32,<br>158] |
| Пробковая<br>плита        | 95-130      | 0,035-0,049 |                     | 0,20-0,14 | 120 | при длительном<br>воздействии<br>деформируется   | долговечность,<br>износостойкость  | теплоизоляция<br>трубопроводов,<br>отделочный<br>материал для<br>стен и потолков                                 | [23,25,<br>26,32,<br>158] |
| Полимеры                  |             |             |                     |           |     |  |  |  |                           |
| Пенополистирол<br>(ППС)   | 25-50       | 0,027-0,05  | 0,4-3% по<br>объему | 0,08-0,50 | 75  | возможно<br>частичное<br>разрушение при  | при воздействии<br>влаги<br>термоизоляцион   | теплоизоляция<br>трубопроводов   | [25,32,<br>161]           |

|   |        |             |                |             |         |  |  |   |                    |
|---|--------|-------------|----------------|-------------|---------|--|--|---|--------------------|
|   |        |             |                |             |         | температуре выше 80 градусов, низкая паропроницаемость | ные свойства сохраняются, малый вес  |   |                    |
| Пенополиуретан (ППУ)  | 50-100 | 0,033-0,050 | 0,8% по объему | 0,10-0,22   | 110-150 | УФ излучение приводит к быстрому износу материала      | теплостойкость, морозостойкость, хорошая сцепляемость с различными материалами<br>легкость                         | уеплоизоляция трубопроводов и ограждающих конструкций                 | [25, 32, 159, 162] |
| Карбамидо-формальдегидные, мочевино-формальдегидные пенно- и поропласты | 8-25   | 0,03-0,05   | 20% от массы   | 0,003-0,025 | 120     |  | долговечность, износостойкость, звукоизоляция  | изоляция в холодильной технике и строительстве                        | [25, 32]           |
| Полиэтиленовые и полиэфирные поропласты                                 | 20-55  | 0,035-0,048 | 10% от массы   | 0,020-0,025 | 75      |  | водо-, газо- и паро- непроницаемость, небольшая масса, эластичность, химическая стойкость, устойчивость к коррозии | теплоизоляция паропроводов, тепло- и пароизоляция кровли, стен и пола | [25, 32]           |
| Пенополипропилен НПП ЛФ   | 40     | 0,034       | 8% от массы    | 0,025       | 75      |  | тепло-, паро- и звукоизоляция, не подвержен гниению и коррозии   | теплоизоляция паропроводов, тепло- и пароизоляция кровли, стен и пола | [25, 32]           |
| Фенольно-резольные поропласты (ФРП)                                     | 65-110 | 0,041-0,043 |                | 0,4-3,0     | 130-150 |  | теплостойкость, морозостойкость, огнестойкость   | изоляция трубопроводов, промышленного оборудования,                   | [25, 32]           |

|  |       |            |  |  |     |  |   |   |                     |
|--|-------|------------|--|--|-----|--|---|---|---------------------|
|  |       |            |  |  |     |  |   | строительных<br>ограждающих<br>конструкций  |                     |
| Вспененные<br>синтетические<br>каучуки | 40-70 | 0,038-0,04 |  |  | 105 |  | высокая паро- и<br>водонепроницае<br>мость,<br>эластичность в<br>широком<br>диапазоне<br>температур,<br>способность к<br>самозатуханию<br>при пожаре,<br>высокая<br>стойкость к<br>микроорганизма<br>м, плесени,<br>атмосферным<br>явлениям | изоляция систем<br>теплоснабжения,<br>нефтепроводов,<br>резервуаров,<br>холодильных<br>установок,<br>холодных<br>трубопроводов и<br>емкостей, систем<br>кондиционирова<br>ния воздуха,<br>вентиляции и<br>водоснабжения | [25,<br>32,<br>163] |

Сценарий расчета полной математической модели тепловых процессов в тепловой изоляции тепловых сетей с нанесенным ТПП в программе *FlexPDE*.

{Fill in the following sections (removing comment marks! if necessary),  
and delete those that are unused.}

TITLE 'Convection heat transfer of insulation' {the problem identification}

COORDINATES cartesian2 {coordinate system, 1D,2D,3D, etc}

VARIABLES {system variables}

u p psi {choose your own names}

phi

! SELECT {method controls}

DEFINITIONS {parameter definitions}

rr0=57e-3/2

delta1=60e-3

delta2=0.2e-3

R0=rr0!/rr0

R1=(rr0+delta1)!/rr0

R2=(rr0+delta1+delta2)!/rr0

dR=R1

l1=0.045

l2=0.152555

!Bi=100

alfa=5.21 !Bi\*l1/delta1

Bi=alfa\*delta1/l1

t0=100

t3=5

mesh\_density =50

kp1=STAGED (1e-11, 1e-10, 1e-9, 1e-8, 1e-7)!1e-7

Kp2=1e-10

mu=1.85e-5

K1=kp1/mu

ro0=1.293

betta=3.67e-3

cp=1005

!roCp=1\*1000

vx=-K1\*DX(p)

ro=ro0\*(1-betta\*u)

ro1=ro0\*(1-betta\*(t0+t3)/2)

roCp=ro1\*cp

vy=-K1\*(DY(p)+ro\*9.81) {для отключения естественной конвекции

поменять ro на ro1}

v=vector(vx,vy)

p0=ro0\*(1-betta\*t3)\*9.81\*(2\*R1-y)

qout=(u-t3)/(delta2/l2+1/alfa)

ql=-l1\*grad(u)

qkm=magnitude(v)\*roCp\*u

qk=v\*roCp\*u

q=q1+qk

qs=50/0.005\*(t0-u)

Ra=9.81\*betta\*(t0-t3)\*(delta1+delta2)\*ro1^2\*cp\*kp1/l1/mu

r=(x^2+(y-R1)^2)^(1/2)

uinit=t0-ln(r/R0)/ln(R1/R0)\*(t0-t3)

pinit=ro0\*(1-betta\*uinit)\*9.81\*(2\*R1-y)

!TRANSFER("transfer8e-7.dat",utable,ptable)

w = zcomp(curl(vx,vy)) ! vorticity is the source for streamline equation

!(d -> Re

pout = SPLINE TABLE("p\_vsphiRe3e3.tbl")

INITIAL VALUES

u=uinit

p=pinit

EQUATIONS {PDE's, one for each variable}

!u=

p: DX(vx)+DY(vy)=0 !p=pinit

u: div(l1\*grad(u))=roCp\*(vx\*DX(u)+vy\*DY(u)) {one possibility} !u=uinit

phi: phi=(arctan((y-dR)/(x+0.00001))+Pi/2)!\*180/pi

then

psi: div(grad(psi)) + w = 0! solve streamline equation separately from velocities

! CONSTRAINTS {Integral constraints}

BOUNDARIES {The domain definition}

REGION 1 'layer1' {For each material region}

START(0,-R0+dR)

mesh\_density =200

natural(u)=qs

value(psi)=0

ARC(CENTER=0,0+dR) ANGLE=180

mesh\_density =100

natural(u)=0

line to (0,R1+dR)

{ value(u)=t3 }

natural(u)=-((u-t3)/(delta2/12+1/alfa))

{ value(p)=ro0\*9.81\*(2\*R1-y) }

natural(p)=(kp2/(mu\*delta2))\*(p-(p0+pout\*1))

natural(psi)=normal(-vy,vx)

ARC(CENTER=0,0+dR) ANGLE=-180

```
natural(u)=0 value(psi)=0 natural(p)=0
line to (0,-R0+dR) close
```

```
FEATURE 'wall0'
START(0,-R0+dR)
ARC(CENTER=0,R1) ANGLE=180
```

```
{REGION 2 'layer2'
k=20
START(0,-R1)
ARC(CENTER=0,0) ANGLE=180 line to (0,R2)
value( u)=0
ARC(CENTER=0,0) ANGLE=-180
natural(u)=0
line to (0,-R1) close}
FEATURE 'wall2'
START(0,0)
ARC(CENTER=0,R1) ANGLE=180
! TIME 0 TO 1 { if time dependent }
MONITORS { show progress }
CONTOUR(u) paint CONTOUR(p) paint
```

```
PLOTS {save result displays}
!elevation (u) on "wall0"
```

```
CONTOUR(u) paint {elevation(u) from (R0,0+dR) to (R0+delta1,0+dR)}
vector(v) CONTOUR(ro) paint elevation (qout) on 'wall2' elevation(magnitude ( q )) on
'wall0' elevation(magnitude ( q )) on 'wall2'
```

```
Vector (q) CONTOUR(psi) elevation (pout) on 'wall2' elevation (u) on
'wall2'
```

```
!transfer (u,p) file="transfer1e-6.dat"
```

SUMMARY

```
report (R0*2*1000) as "D0"
report (delta1*1000) as "delta1"
report (R1*2*1000) as "D1"
report (alfa) report (Bi) report(Ra) report(kp1) report(kp2)
report(LINE_INTEGRAL (qout, 'wall2','layer1' )) report(LINE_INTEGRAL
(normal (q), 'wall0','layer1' )) report(LINE_INTEGRAL (normal (q), 'wall2','layer1' ))
report(LINE_INTEGRAL ( qs , 'wall0','layer1' )) as "Qs (Wt)"
report(LINE_INTEGRAL (qout, 'wall2','layer1')/(pi*R1))
report(LINE_INTEGRAL (normal (q), 'wall0','layer1')/(pi*R0))
report(LINE_INTEGRAL (normal (q), 'wall2','layer1')/(pi*R1))
report(LINE_INTEGRAL (qs, 'wall0','layer1' )/(pi*R0)) as "qs (Wt/m2)"
END
```

Результаты расчета полной математической модели тепловых процессов в тепловой изоляции тепловых сетей с нанесенным ТПП в программе *FlexPDE*.

1. Обтекание в условиях естественной конвекции в помещении (техническом подполье, подвале и т.д.)

Таблица 1.1. Нормальные условия  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ ,  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$

|     | alfa | Ra    | Bi   | kp1                   | kp2                   | qnormal | qout  |
|-----|------|-------|------|-----------------------|-----------------------|---------|-------|
| 57  | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | 121,29  | 39,23 |
| 108 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | 95,99   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | 85,83   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | 60,16   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | 55,817  | 42,87 |

Таблица 1.2. При  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$

|     | alfa | Ra    | Bi   | kp1                   | kp2                   | qnormal | qout  |
|-----|------|-------|------|-----------------------|-----------------------|---------|-------|
| 57  | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 121,29  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 95,99   | 45,55 |
| 159 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 85,78   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 60,26   | 44,41 |
| 530 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 121,32  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 96,01   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 85,80   | 49,05 |
| 325 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 60,25   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 124,14  | 39,01 |
| 108 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 97,39   | 45,41 |
| 159 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 86,87   | 48,96 |
| 325 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 60,29   | 40,42 |

|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
|-----|------|-------|------|----------------------|-----------------------|--------|-------|
| 530 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 55,85  | 42,87 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 186,60 | 44,70 |
| 108 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 133,66 | 48,94 |
| 159 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 116,04 | 50,98 |
| 325 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 63,45  | 40,87 |
| 530 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 56,80  | 43,03 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 387,23 | 54,96 |
| 108 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 272,78 | 62,09 |
| 159 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 231,14 | 64,49 |
| 325 | 5,21 | 36,09 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 106,59 | 50,33 |
| 530 | 5,21 | 36,09 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | 80,84  | 49,33 |

Таблица 1.3. При  $Kp_2=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ 

|     | alfa | Ra    | Bi   | kp1                   | kp2                   | qnormal | qout  |
|-----|------|-------|------|-----------------------|-----------------------|---------|-------|
| 57  | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 121,29  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 96,00   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 85,78   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 60,26   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 121,33  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 96,01   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 85,80   | 49,05 |
| 325 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 60,25   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 123,74  | 39,06 |
| 108 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 97,21   | 45,43 |
| 159 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 86,77   | 48,98 |
| 325 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 60,29   | 40,42 |

|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
|-----|------|-------|------|----------------------|-----------------------|--------|-------|
| 530 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 55,85  | 42,87 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 164,87 | 42,42 |
| 108 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 121,78 | 47,78 |
| 159 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 107,12 | 50,61 |
| 325 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 62,67  | 40,83 |
| 530 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 56,65  | 43,02 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 279,39 | 57,85 |
| 108 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 202,10 | 62,11 |
| 159 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 175,80 | 63,35 |
| 325 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 91,00  | 50,64 |
| 530 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,00 \cdot 10^{-11}$ | 74,39  | 49,47 |

Таблица 1.4. При  $Kp_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ 

|     | alfa | Ra    | Bi   | kp1                   | kp2                   | qnormal | qout  |
|-----|------|-------|------|-----------------------|-----------------------|---------|-------|
| 57  | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 121,29  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 96,00   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 85,78   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 60,26   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 121,33  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 96,01   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 85,79   | 49,05 |
| 325 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 60,25   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 122,53  | 39,18 |
| 108 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 96,63   | 45,50 |
| 159 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 86,39   | 49,03 |
| 325 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 60,28   | 40,42 |

|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
|-----|------|-------|------|----------------------|-----------------------|--------|-------|
| 530 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 55,86  | 42,87 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 131,01 | 39,91 |
| 108 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 102,33 | 46,07 |
| 159 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 91,90  | 49,48 |
| 325 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 61,27  | 40,66 |
| 530 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 56,27  | 42,97 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 180,21 | 52,89 |
| 108 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 129,29 | 56,11 |
| 159 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 103,94 | 57,45 |
| 325 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 70,75  | 46,96 |
| 530 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,40 \cdot 10^{-12}$ | 62,01  | 46,87 |

Таблица 1.5. При  $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ 

|     | alfa | Ra    | Bi   | kp1                   | kp2                   | qnormal | qout  |
|-----|------|-------|------|-----------------------|-----------------------|---------|-------|
| 57  | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 121,29  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 96,00   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 85,78   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 60,26   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 121,30  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 96,00   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 85,79   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 60,25   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 121,35  | 39,23 |
| 108 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 96,02   | 45,54 |
| 159 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 85,83   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 60,26   | 40,42 |

|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
|-----|------|-------|------|----------------------|-----------------------|--------|-------|
| 530 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 55,85  | 42,87 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 122,01 | 39,39 |
| 108 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 96,27  | 45,64 |
| 159 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 86,08  | 49,13 |
| 325 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 60,31  | 40,47 |
| 530 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 55,92  | 42,88 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 155,70 | 50,25 |
| 108 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 110,77 | 52,97 |
| 159 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 90,12  | 54,03 |
| 325 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 63,49  | 44,44 |
| 530 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,30 \cdot 10^{-13}$ | 51,41  | 44,52 |

Таблица 1.6. При  $Kp_2=1,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ 

|     | alfa | Ra    | Bi   | kp1                   | kp2                   | qnormal | qout  |
|-----|------|-------|------|-----------------------|-----------------------|---------|-------|
| 57  | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 121,29  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 96,00   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,003 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 85,78   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 60,26   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,004 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-11}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 121,30  | 39,22 |
| 108 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 96,00   | 45,53 |
| 159 | 5,21 | 0,027 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 85,79   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 60,25   | 40,41 |
| 530 | 5,21 | 0,036 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-10}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 55,82   | 42,87 |
|     |      |       |      |                       |                       |         |       |
| 57  | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 121,34  | 39,23 |
| 108 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 96,01   | 45,54 |
| 159 | 5,21 | 0,27  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 85,82   | 49,06 |
| 325 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$  | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 60,26   | 40,41 |

|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
|-----|------|-------|------|----------------------|-----------------------|--------|-------|
| 530 | 5,21 | 0,36  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 55,85  | 42,87 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 121,97 | 39,39 |
| 108 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 96,25  | 45,64 |
| 159 | 5,21 | 2,71  | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 86,05  | 49,13 |
| 325 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 60,30  | 40,47 |
| 530 | 5,21 | 3,61  | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 55,92  | 42,88 |
|     |      |       |      |                      |                       |        |       |
| 57  | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 155,50 | 50,22 |
| 108 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 110,62 | 52,93 |
| 159 | 5,21 | 27,09 | 6,95 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 90,02  | 54,00 |
| 325 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 63,42  | 44,41 |
| 530 | 5,21 | 36,08 | 9,26 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,80 \cdot 10^{-13}$ | 50,16  | 44,35 |

## 2. Обтекание в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе

Таблица 2.1. Нормальные условия  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ ,  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$

|     | alfa   | Ra    | Re        | kp1                  | kp2                  | Nu     | Bi      | qnormal | qout   |
|-----|--------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 57  | 153,13 | 0,003 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | 177,15 | 602,30  | 290,65  | 94,13  |
| 108 | 138,38 | 0,003 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | 206,21 | 701,11  | 231,88  | 110,68 |
| 159 | 127,64 | 0,003 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | 232,76 | 791,39  | 209,38  | 120,09 |
| 325 | 102,32 | 0,004 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | 324,33 | 1102,74 | 144,37  | 97,04  |
| 530 | 88,86  | 0,004 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | 400,74 | 1362,50 | 134,55  | 103,38 |

Таблица 2.2. При  $Kp_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$

|     | alfa   | Ra       | Re        | kp1                  | kp2                  | Nu     | Bi      | qnormal | qout   |
|-----|--------|----------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 57  | 152,68 | 0,00314  | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 177,15 | 600,55  | 290,65  | 94,13  |
| 108 | 137,98 | 0,00314  | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 206,21 | 699,07  | 231,88  | 110,68 |
| 159 | 127,27 | 0,00314  | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 232,76 | 789,09  | 209,38  | 120,09 |
| 325 | 102,02 | 0,004183 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 324,33 | 1099,53 | 144,37  | 97,04  |
| 530 | 88,60  | 0,004183 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 400,74 | 1358,54 | 134,55  | 103,38 |
|     |        |          |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68 | 0,031    | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 177,15 | 600,55  | 305,71  | 98,50  |

|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
|-----|--------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 108 | 137,98 | 0,031 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 206,21 | 699,07  | 243,08  | 114,23 |
| 159 | 127,27 | 0,031 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 232,76 | 789,09  | 212,69  | 122,61 |
| 325 | 102,02 | 0,042 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 324,33 | 1099,53 | 146,28  | 98,06  |
| 530 | 88,60  | 0,042 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 400,74 | 1358,54 | 135,14  | 103,75 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68 | 0,314 | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 177,15 | 600,55  | 556,40  | 169,29 |
| 108 | 137,98 | 0,314 | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 206,21 | 699,07  | 420,94  | 177,05 |
| 159 | 127,27 | 0,314 | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 232,76 | 789,09  | 339,93  | 179,05 |
| 325 | 102,02 | 0,418 | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 324,33 | 1099,53 | 213,24  | 132,99 |
| 530 | 88,60  | 0,418 | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 400,74 | 1358,54 | 167,88  | 123,90 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68 | 3,14  | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 177,15 | 600,55  | 1501,72 | 431,25 |
| 108 | 137,98 | 3,14  | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 206,21 | 699,07  | 997,22  | 425,03 |
| 159 | 127,27 | 3,14  | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 232,76 | 789,09  | 650,05  | 366,83 |
| 325 | 102,02 | 4,18  | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 324,33 | 1099,53 | 422,06  | 243,34 |
| 530 | 88,60  | 4,18  | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 400,74 | 1358,54 | 365,47  | 218,32 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68 | 31,40 | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 177,15 | 600,55  | 2484,64 | 533,94 |
| 108 | 137,98 | 31,40 | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 206,21 | 699,07  | 1811,94 | 703,16 |
| 159 | 127,27 | 31,40 | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 232,76 | 789,09  | 1035,20 | 811,22 |
| 325 | 102,02 | 41,83 | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 324,33 | 1099,53 | 507,11  | 795,16 |
| 530 | 88,60  | 41,83 | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | 400,74 | 1358,54 | 405,27  | 597,07 |

Таблица 2.3. При  $Kp_2=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ 

|     | alfa   | Ra    | Re        | kp1                  | kp2                  | Nu     | Bi      | qnormal | qout   |
|-----|--------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 57  | 152,68 | 0,003 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 177,15 | 600,55  | 290,65  | 94,13  |
| 108 | 137,98 | 0,003 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 206,21 | 699,07  | 231,88  | 110,68 |
| 159 | 127,28 | 0,003 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 232,76 | 789,09  | 209,38  | 120,09 |
| 325 | 102,02 | 0,004 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 324,33 | 1099,53 | 144,37  | 97,04  |
| 530 | 88,60  | 0,004 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 400,74 | 1358,54 | 134,55  | 103,38 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68 | 0,031 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 177,15 | 600,55  | 305,45  | 98,43  |

|     |         |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
|-----|---------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 108 | 137,98  | 0,031 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 206,21 | 699,07  | 242,91  | 114,17 |
| 159 | 127,28  | 0,031 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 232,76 | 789,09  | 212,63  | 122,58 |
| 325 | 102,02  | 0,042 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 324,33 | 1099,53 | 146,26  | 98,05  |
| 530 | 88,60   | 0,042 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 400,74 | 1358,54 | 135,14  | 103,74 |
|     |         |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68  | 0,314 | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 177,15 | 600,55  | 542,25  | 166,29 |
| 108 | 137,98  | 0,314 | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 206,21 | 699,07  | 411,36  | 174,33 |
| 159 | 127,278 | 0,314 | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 232,76 | 789,09  | 326,22  | 176,51 |
| 325 | 102,02  | 0,418 | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 324,33 | 1099,53 | 210,26  | 131,70 |
| 530 | 88,60   | 0,418 | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 400,74 | 1358,54 | 166,63  | 123,23 |
|     |         |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68  | 3,14  | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 177,15 | 600,55  | 1313,70 | 369,72 |
| 108 | 137,98  | 3,14  | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 206,21 | 699,07  | 941,29  | 379,49 |
| 159 | 127,28  | 3,14  | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 232,76 | 789,09  | 596,57  | 356,41 |
| 325 | 102,02  | 4,18  | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 324,33 | 1099,53 | 368,08  | 238,90 |
| 530 | 88,60   | 4,18  | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 400,74 | 1358,54 | 333,03  | 213,18 |
|     |         |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 152,68  | 31,40 | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 177,15 | 600,55  | 1871,93 | 449,92 |
| 108 | 137,98  | 31,40 | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 206,21 | 699,07  | 1465,02 | 516,25 |
| 159 | 127,28  | 31,40 | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 232,76 | 789,09  | 956,08  | 551,66 |
| 325 | 102,02  | 41,83 | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 324,33 | 1099,53 | 540,38  | 491,65 |
| 530 | 88,60   | 41,83 | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $3,0 \cdot 10^{-11}$ | 400,74 | 1358,54 | 443,96  | 484,35 |

Таблица 2.4. При  $Kp_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ 

|     | alfa   | Ra    | Re        | kp1                  | kp2                  | Nu     | Bi      | qnormal | qout   |
|-----|--------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 57  | 153,49 | 0,003 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 177,15 | 603,71  | 290,65  | 94,13  |
| 108 | 138,70 | 0,003 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 206,21 | 702,76  | 231,87  | 110,68 |
| 159 | 127,94 | 0,003 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 232,76 | 793,25  | 209,38  | 120,09 |
| 325 | 102,56 | 0,004 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 324,33 | 1105,33 | 144,37  | 97,04  |
| 530 | 89,07  | 0,004 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 400,74 | 1365,70 | 134,55  | 103,38 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 153,49 | 0,031 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 177,15 | 603,71  | 303,91  | 97,99  |

|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
|-----|--------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 108 | 138,70 | 0,031 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 206,21 | 702,76  | 241,92  | 113,85 |
| 159 | 127,94 | 0,031 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 232,76 | 793,25  | 212,27  | 122,38 |
| 325 | 102,56 | 0,041 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 324,33 | 1105,33 | 146,16  | 98,00  |
| 530 | 89,07  | 0,041 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 400,74 | 1365,70 | 135,12  | 103,73 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 153,49 | 0,314 | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 177,15 | 603,71  | 478,04  | 149,43 |
| 108 | 138,70 | 0,314 | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 206,21 | 702,76  | 356,22  | 159,65 |
| 159 | 127,94 | 0,314 | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 232,76 | 793,25  | 297,244 | 163,17 |
| 325 | 102,56 | 0,418 | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 324,33 | 1105,33 | 196,024 | 125,01 |
| 530 | 89,07  | 0,418 | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 400,74 | 1365,70 | 160,51  | 119,73 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 153,49 | 3,14  | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 177,15 | 603,71  | 794,69  | 236,85 |
| 108 | 138,70 | 3,14  | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 206,21 | 702,76  | 611,82  | 257,42 |
| 159 | 127,94 | 3,14  | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 232,76 | 793,25  | 480,79  | 257,77 |
| 325 | 102,56 | 4,18  | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 324,33 | 1105,33 | 306,06  | 196,34 |
| 530 | 89,07  | 4,18  | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 400,74 | 1365,70 | 246,10  | 178,42 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 153,49 | 31,40 | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 177,15 | 603,71  | 890,66  | 259,73 |
| 108 | 138,70 | 31,40 | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 206,21 | 702,76  | 728,10  | 295,62 |
| 159 | 127,94 | 31,40 | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 232,76 | 793,25  | 599,76  | 311,87 |
| 325 | 102,56 | 41,83 | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 324,33 | 1105,33 | 421,51  | 272,39 |
| 530 | 89,07  | 41,83 | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $5,4 \cdot 10^{-12}$ | 400,74 | 1365,70 | 365,58  | 269,65 |

Таблица 2.5. При  $Kp_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ 

|     | alfa   | Ra    | Re        | kp1                  | kp2                  | Nu     | Bi      | qnormal | qout   |
|-----|--------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 57  | 154,18 | 0,003 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 606,42  | 290,60  | 94,11  |
| 108 | 139,33 | 0,003 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 705,92  | 231,81  | 110,67 |
| 159 | 128,52 | 0,003 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 796,81  | 209,39  | 120,08 |
| 325 | 103,02 | 0,004 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1110,29 | 144,36  | 97,03  |
| 530 | 89,47  | 0,004 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1371,83 | 134,10  | 103,38 |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 154,18 | 0,031 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 606,42  | 293,10  | 94,87  |

|     |        |       |           |                      |                      |        |         |        |         |
|-----|--------|-------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|--------|---------|
| 108 | 139,33 | 0,031 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 705,92  | 234,17 | 11,36   |
| 159 | 128,52 | 0,031 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 796,81  | 209,67 | 120,65  |
| 325 | 103,02 | 0,042 | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1110,29 | 145,03 | 97,40   |
| 530 | 89,47  | 0,042 | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1371,83 | 134,81 | 103,56  |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |        |         |
| 57  | 154,18 | 0,31  | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 606,42  | 298,47 | 96,50   |
| 108 | 139,33 | 0,31  | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 705,92  | 239,25 | 113,28  |
| 159 | 128,52 | 0,31  | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 796,81  | 212,94 | 122,62  |
| 325 | 103,02 | 0,42  | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1110,29 | 148,81 | 99,59   |
| 530 | 89,47  | 0,42  | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1371,83 | 137,26 | 105,25  |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |        |         |
| 57  | 154,18 | 3,14  | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 606,42  | 299,96 | 96,96   |
| 108 | 139,33 | 3,14  | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 705,92  | 241,05 | 114,006 |
| 159 | 128,52 | 3,14  | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 796,81  | 214,80 | 123,58  |
| 325 | 103,02 | 4,18  | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1110,29 | 152,08 | 101,48  |
| 530 | 89,47  | 4,18  | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1371,83 | 140,61 | 107,58  |
|     |        |       |           |                      |                      |        |         |        |         |
| 57  | 154,18 | 31,40 | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 606,42  | 300,13 | 97,01   |
| 108 | 139,33 | 31,40 | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 705,92  | 241,28 | 114,09  |
| 159 | 128,52 | 31,40 | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 796,81  | 215,07 | 123,71  |
| 325 | 103,02 | 41,83 | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1110,29 | 152,70 | 101,85  |
| 530 | 89,47  | 41,83 | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $2,3 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1371,83 | 141,59 | 108,25  |

Таблица 2.6. При  $Kp_2=1,8 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ 

|     | alfa   | Ra     | Re        | kp1                  | kp2                  | Nu     | Bi      | qnormal | qout   |
|-----|--------|--------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|---------|--------|
| 57  | 154,77 | 0,003  | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 608,77  | 290,59  | 94,11  |
| 108 | 139,86 | 0,003  | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 708,65  | 231,80  | 110,67 |
| 159 | 129,01 | 0,003  | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 799,89  | 209,39  | 120,08 |
| 325 | 103,42 | 0,004  | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1114,59 | 144,36  | 97,03  |
| 530 | 89,81  | 0,004  | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-11}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1377,14 | 134,55  | 103,38 |
|     |        |        |           |                      |                      |        |         |         |        |
| 57  | 154,77 | 0,0314 | 58247,47  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 608,77  | 292,45  | 94,68  |

|     |        |        |           |                      |                      |        |         |          |        |
|-----|--------|--------|-----------|----------------------|----------------------|--------|---------|----------|--------|
| 108 | 139,86 | 0,0314 | 75030,64  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 708,65  | 233,63   | 111,20 |
| 159 | 129,01 | 0,0314 | 91813,80  | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 799,89  | 209,54   | 120,52 |
| 325 | 103,42 | 0,042  | 159604,60 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1114,59 | 144,91   | 97,34  |
| 530 | 89,81  | 0,042  | 227066,40 | $1,0 \cdot 10^{-10}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1377,14 | 134,78   | 103,53 |
|     |        |        |           |                      |                      |        |         |          |        |
| 57  | 154,77 | 0,31   | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 608,77  | 295,62   | 95,64  |
| 108 | 139,86 | 0,31   | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 708,65  | 236,77   | 112,38 |
| 159 | 129,01 | 0,31   | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 799,89  | 211,57   | 121,77 |
| 325 | 103,42 | 0,42   | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1114,59 | 147,45   | 98,827 |
| 530 | 89,81  | 0,42   | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-9}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1377,14 | 136,52   | 104,74 |
|     |        |        |           |                      |                      |        |         |          |        |
| 57  | 154,77 | 3,14   | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 608,77  | 296,38   | 95,88  |
| 108 | 139,86 | 3,14   | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 708,65  | 237,72   | 112,75 |
| 159 | 129,01 | 3,14   | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 799,89  | 212,55   | 122,28 |
| 325 | 103,42 | 4,18   | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1114,59 | 149,32   | 99,91  |
| 530 | 89,81  | 4,18   | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-8}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1377,14 | 138,70   | 106,19 |
|     |        |        |           |                      |                      |        |         |          |        |
| 57  | 154,77 | 31,40  | 58247,47  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 177,15 | 608,77  | 296,4624 | 95,90  |
| 108 | 139,86 | 31,40  | 75030,64  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 206,21 | 708,65  | 237,8311 | 112,80 |
| 159 | 129,01 | 31,40  | 91813,80  | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 232,76 | 799,89  | 212,6803 | 122,35 |
| 325 | 103,42 | 41,83  | 159604,60 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 324,33 | 1114,59 | 149,646  | 100,10 |
| 530 | 89,81  | 41,83  | 227066,40 | $1,00 \cdot 10^{-7}$ | $1,8 \cdot 10^{-13}$ | 400,74 | 1377,14 | 139,2547 | 106,55 |

Результаты расчета полной математической модели тепловых процессов и скоростей в тепловой изоляции тепловых сетей с нанесенным ТПП в программе FlexPDE.

1. Обтекание в условиях естественной конвекции в помещении (техническом подполье, подвале и т.д.)

Таблица 1.1. Трубопровод диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $Kp_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .

|   | Распределение полей температур, °C | Распределение скоростей, м/с |
|---|------------------------------------|------------------------------|
| Разрушен<br>ный<br>покровны<br>й слой<br>$Kp_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$          |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой без<br>покрытия<br>$Kp_2=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$             |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (1 слой)<br>$Kp_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ |                                    |                              |

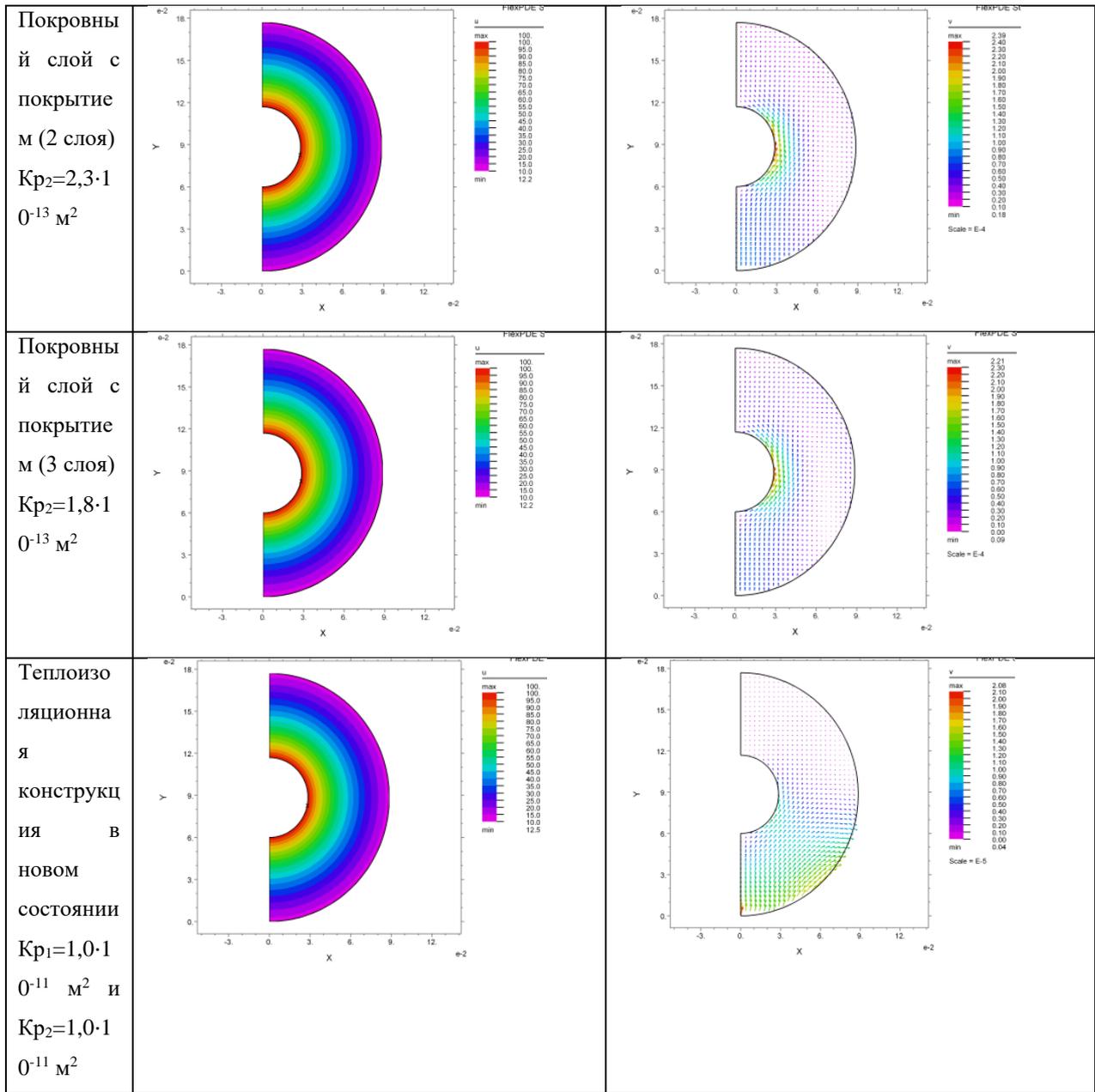
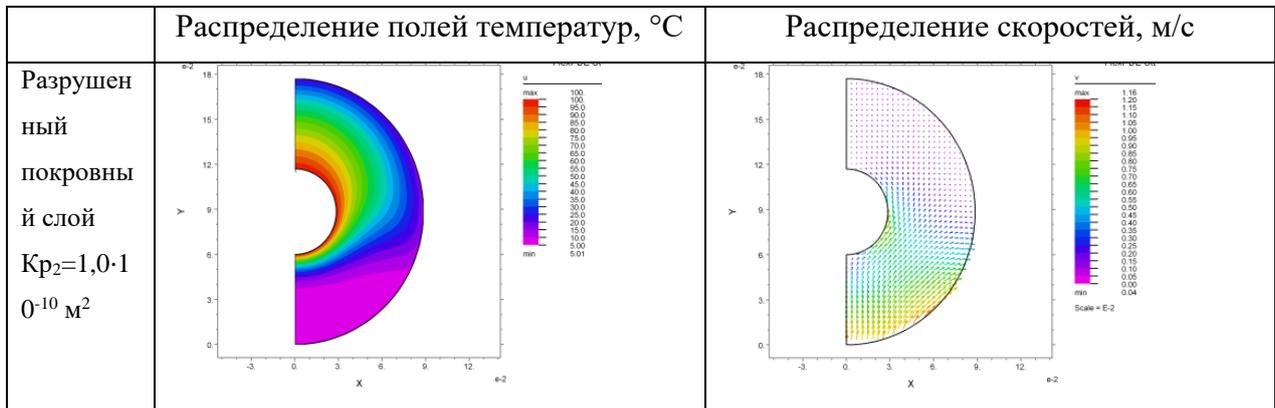
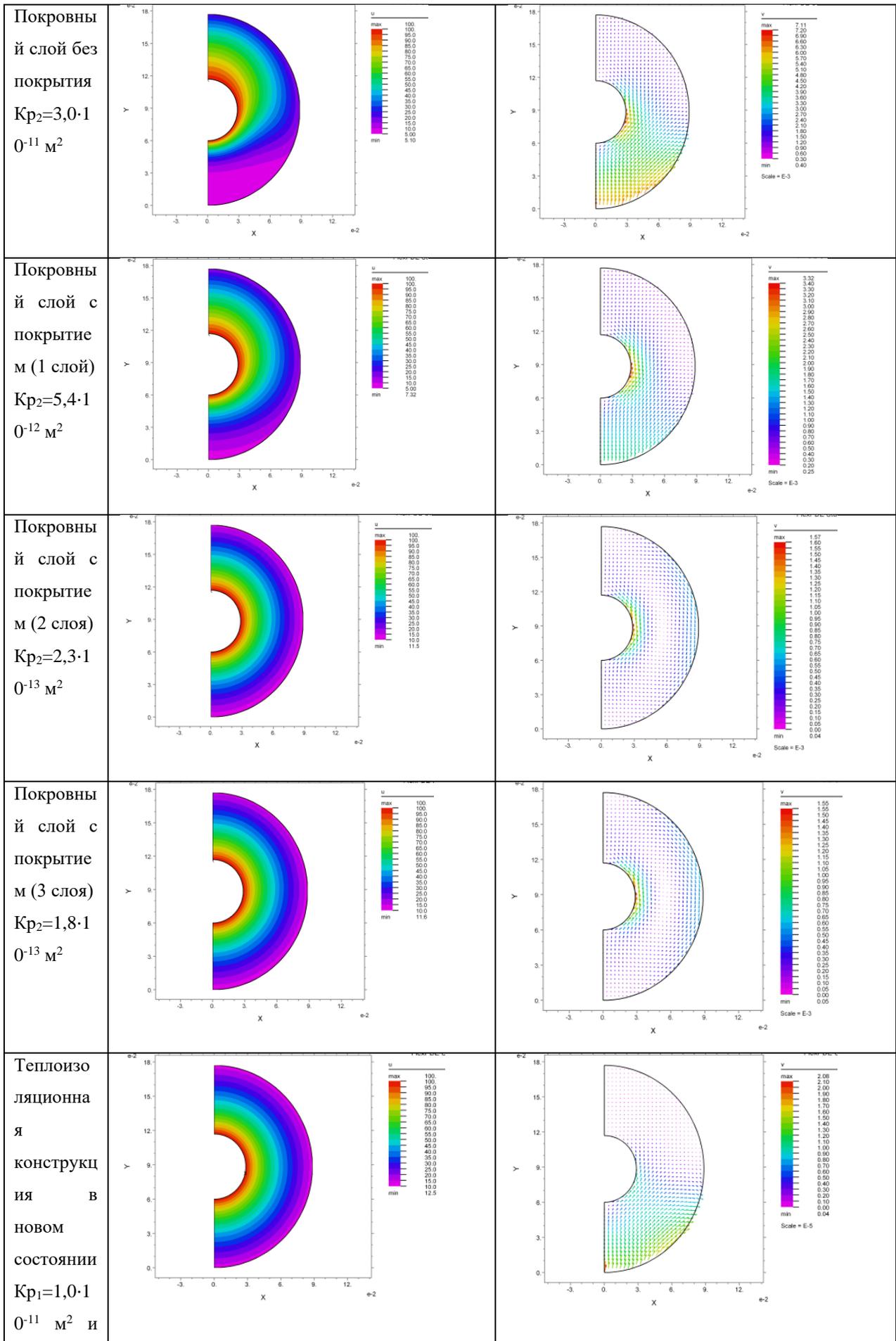


Таблица 1.2. Трубопровод диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .





|   |  |  |
|---|--|--|
| $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$ |  |  |
|---|--|--|

Таблица 1.3. Трубопровод диаметром 108 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .

|   | Распределение полей температур, °C | Распределение скоростей, м/с |
|---|------------------------------------|------------------------------|
| Разрушен<br>ный<br>покровны<br>й слой<br>$K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$          |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой без<br>покрытия<br>$K_{p2}=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$             |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (1 слой)<br>$K_{p2}=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ |                                    |                              |

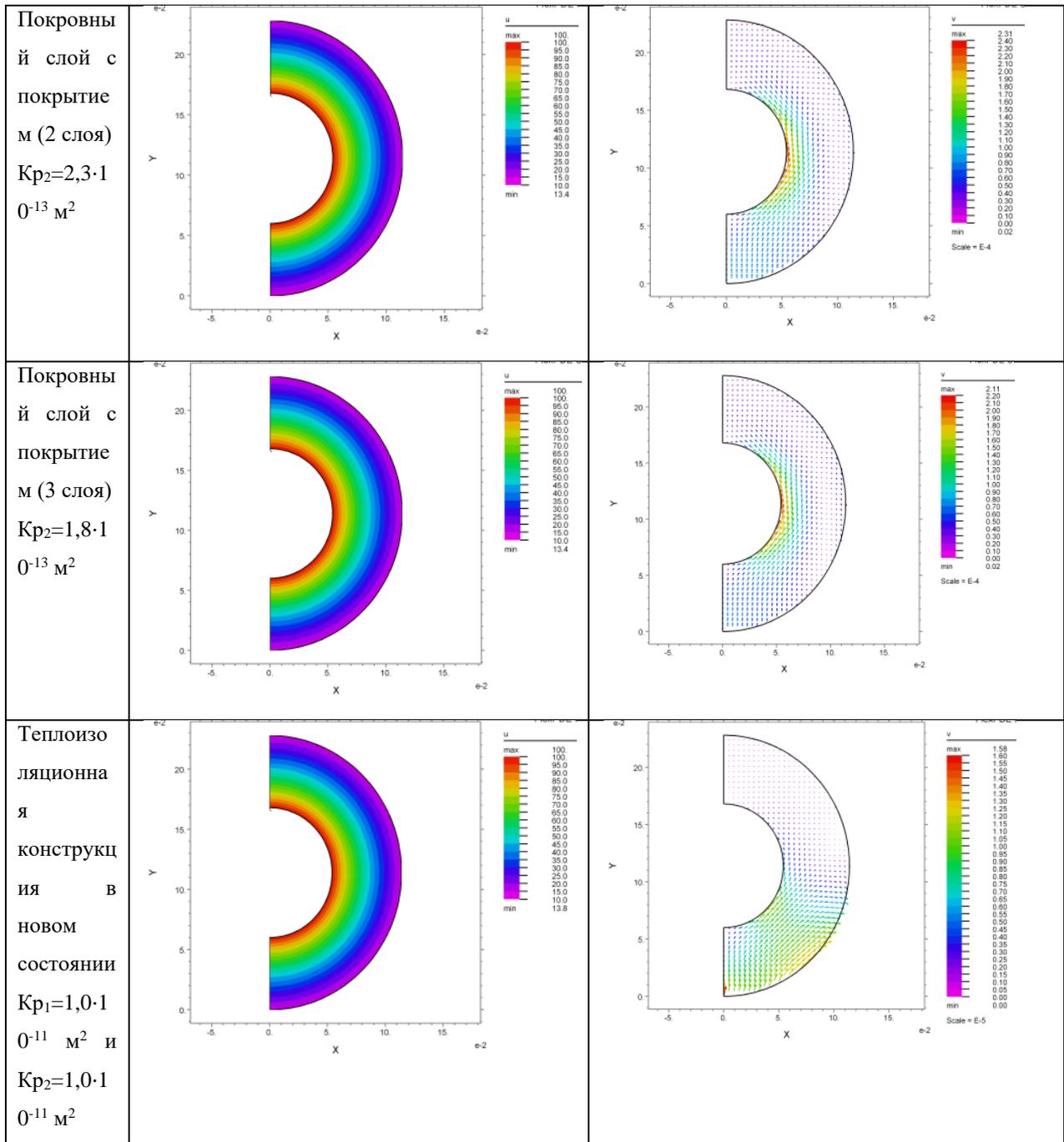
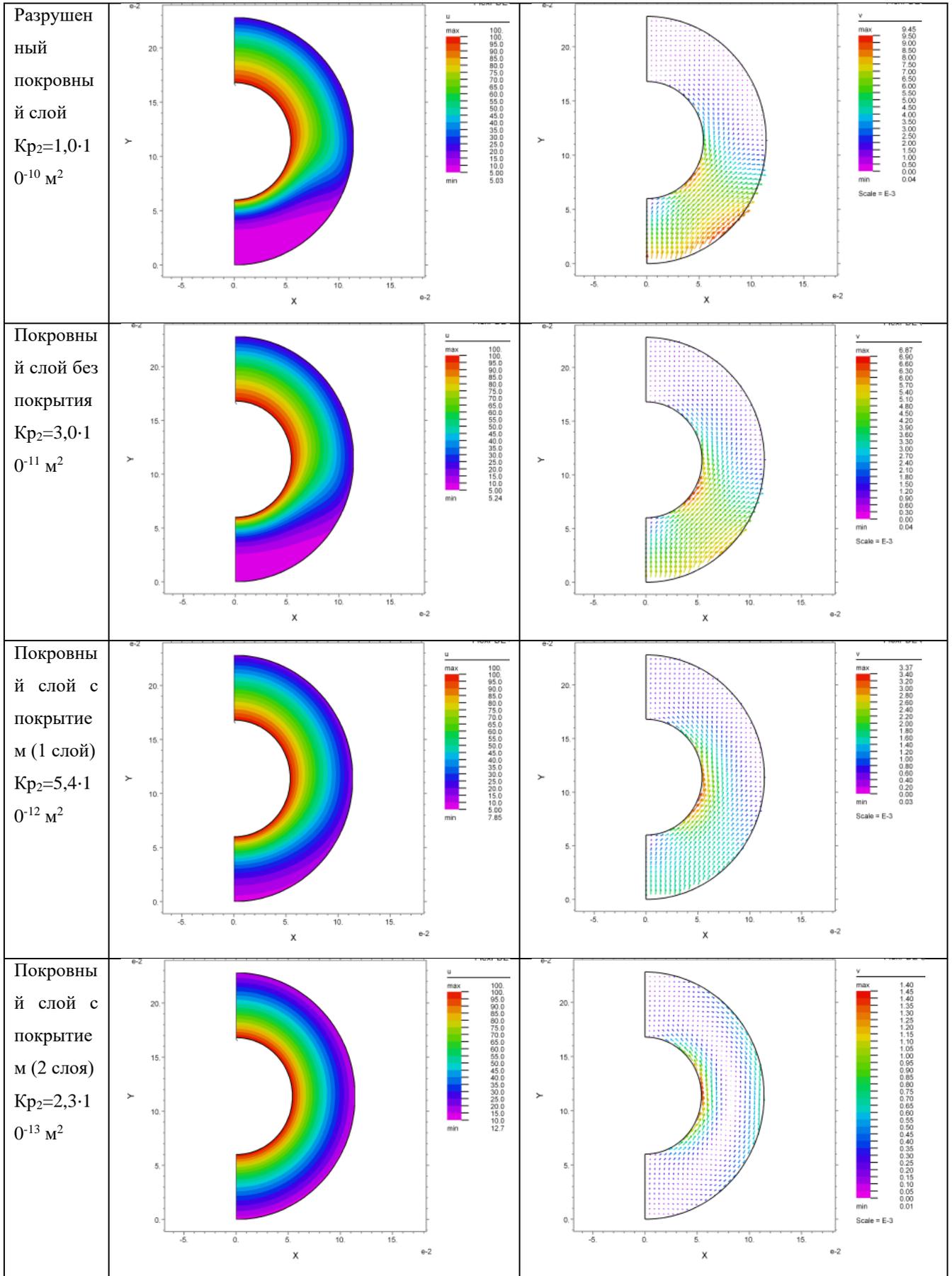


Таблица 1.4. Трубопровод диаметром 108 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .

|  |   |                                     |
|--|---|-------------------------------------|
|  | <p>Распределение полей температур, °С</p> | <p>Распределение скоростей, м/с</p> |
|--|---|-------------------------------------|



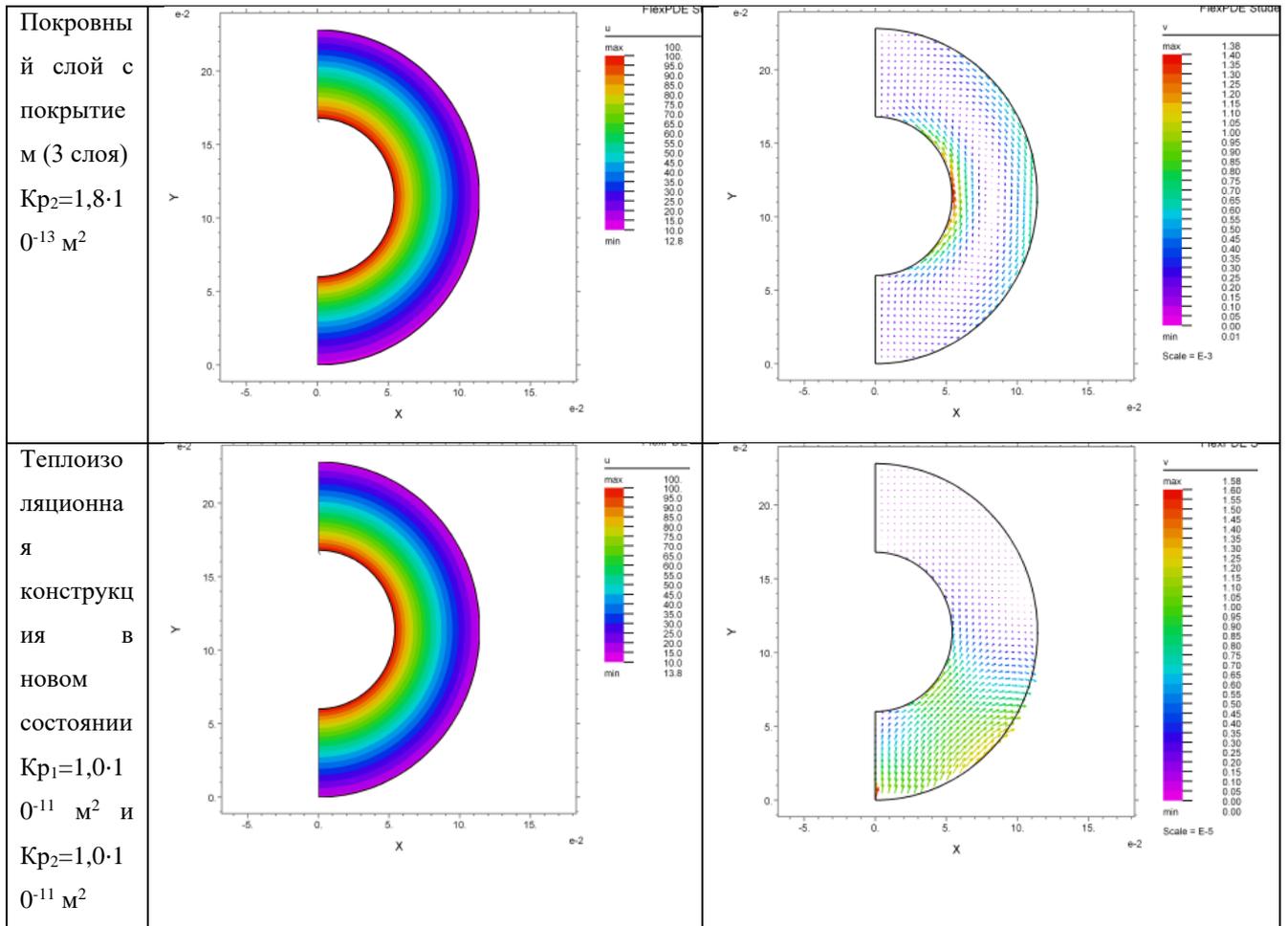
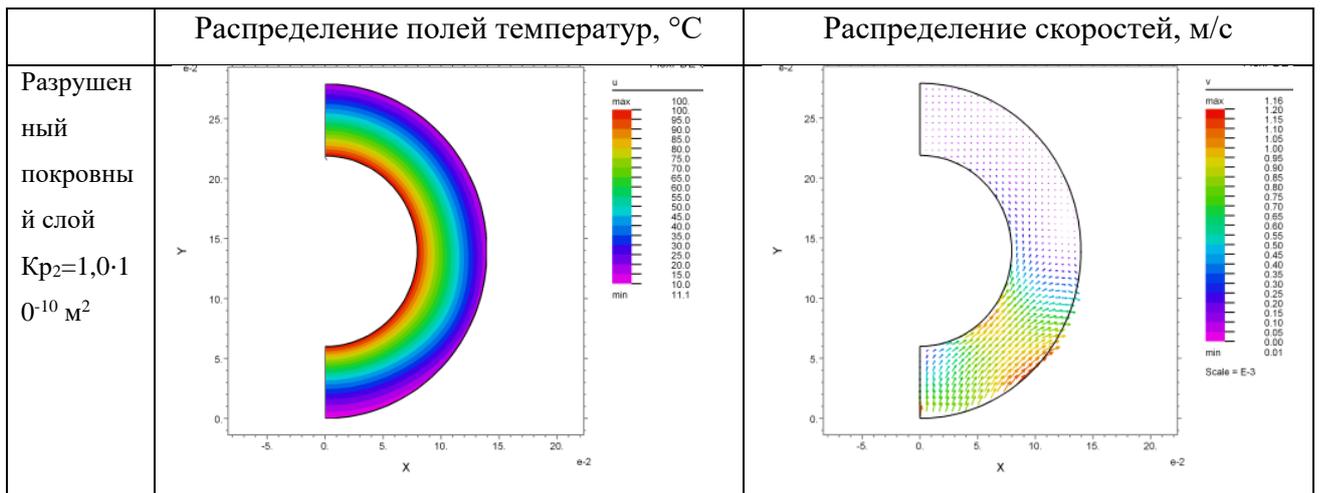
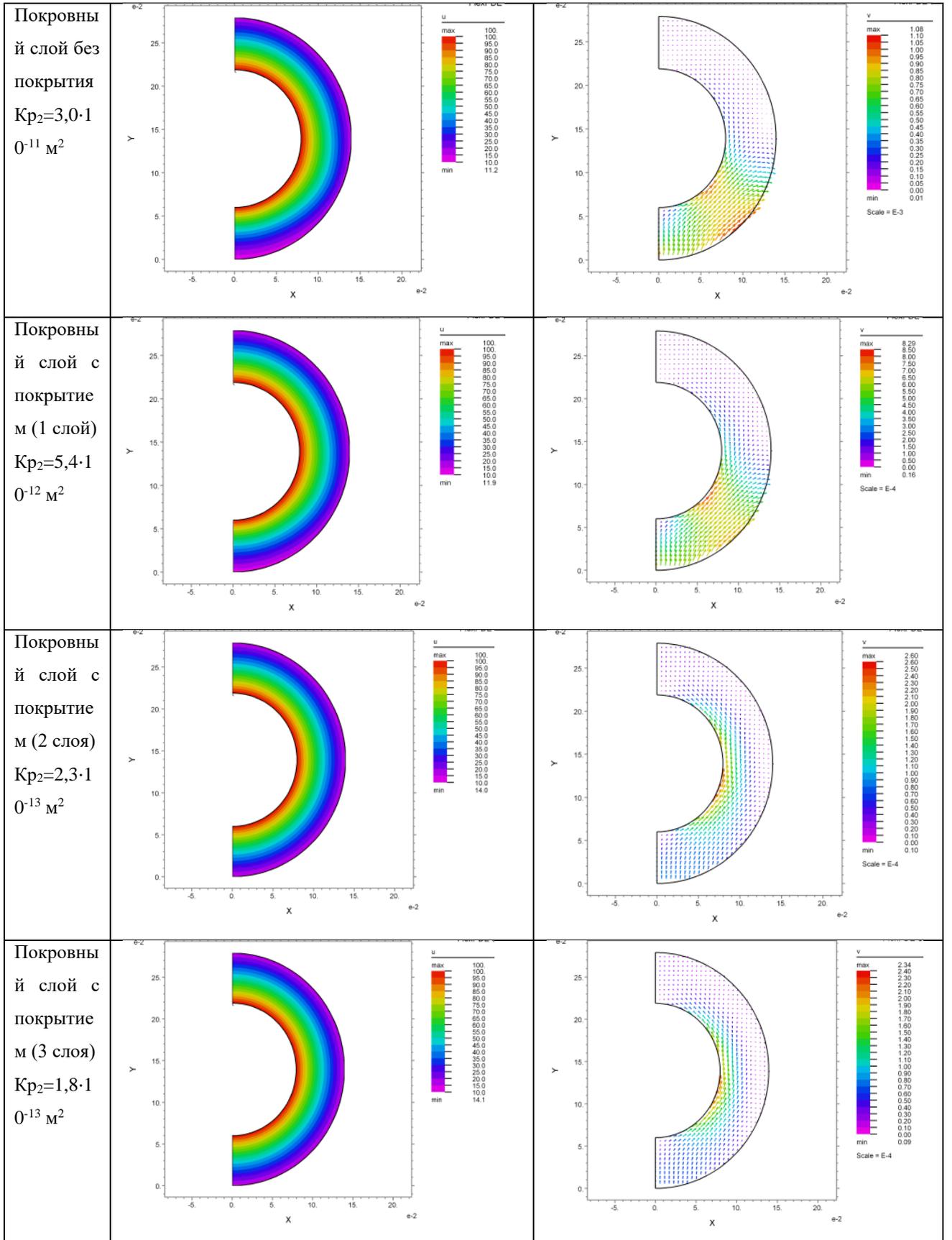


Таблица 1.5. Трубопровод диаметром 159 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .





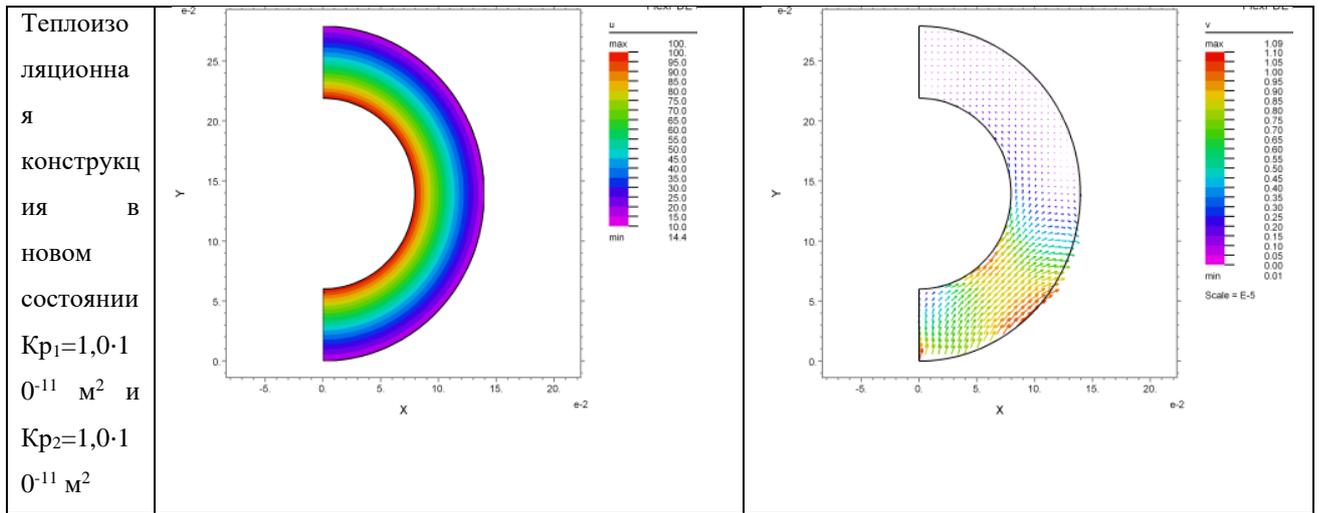
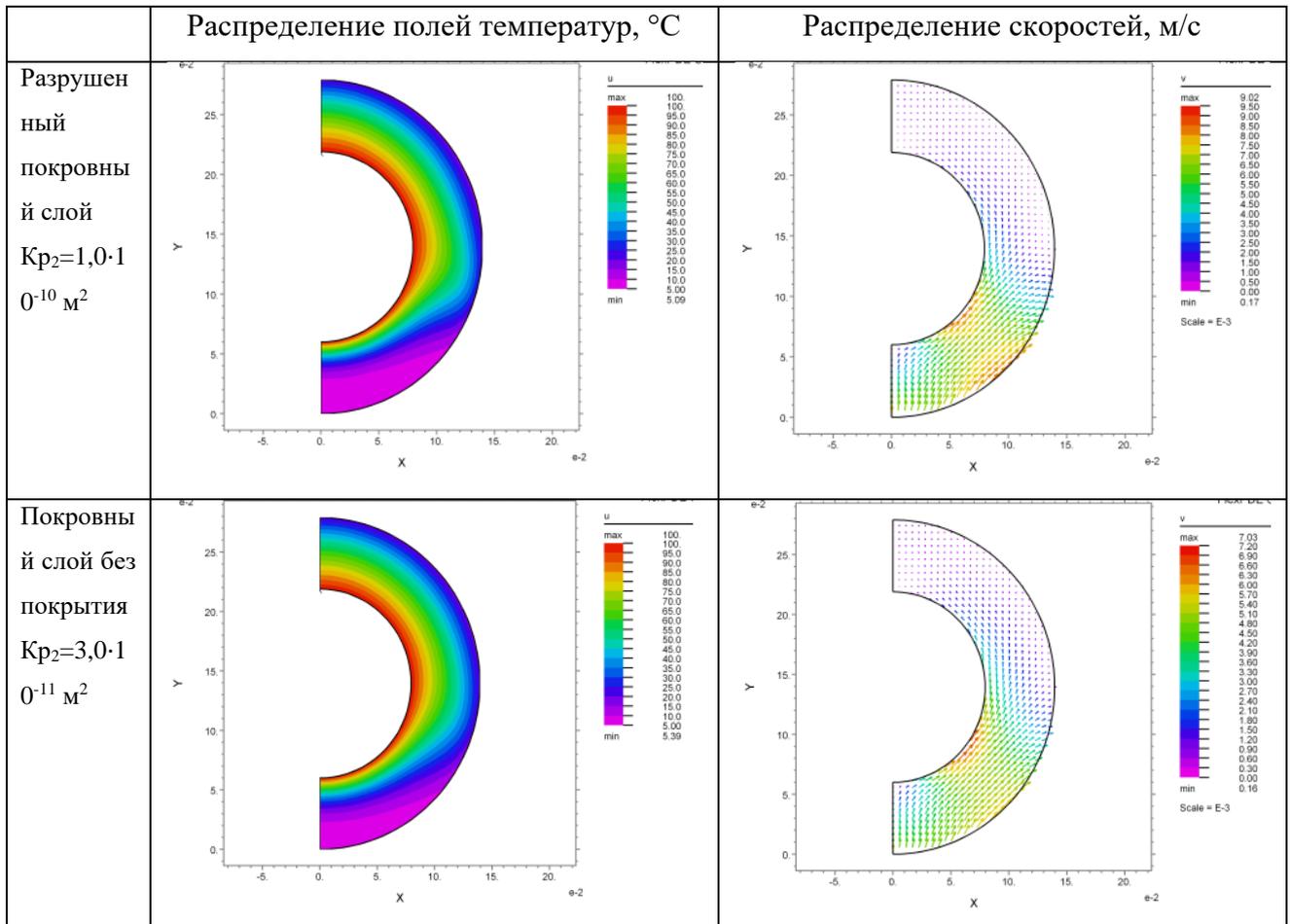


Таблица 1.6. Трубопровод диаметром 159 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .



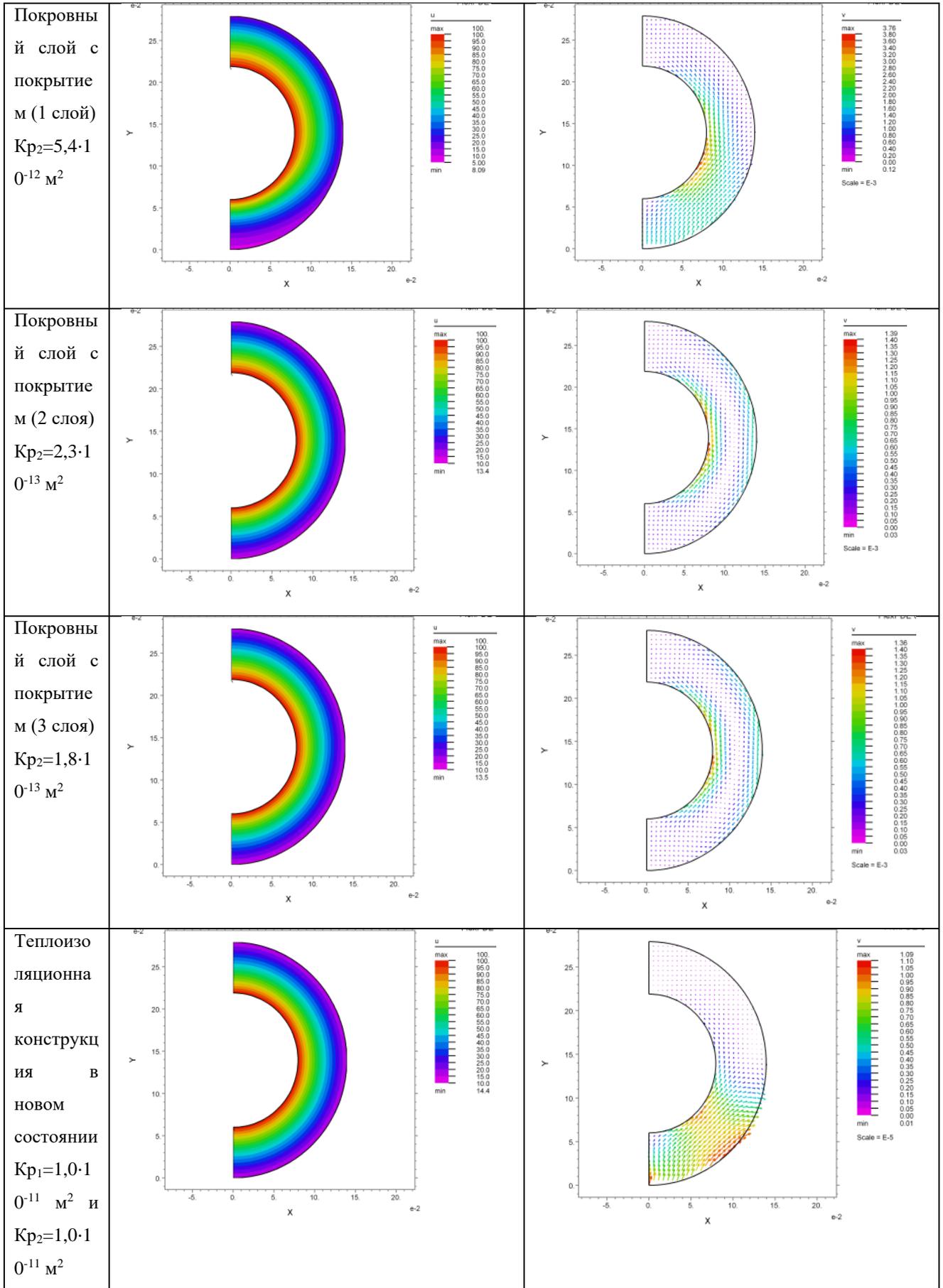
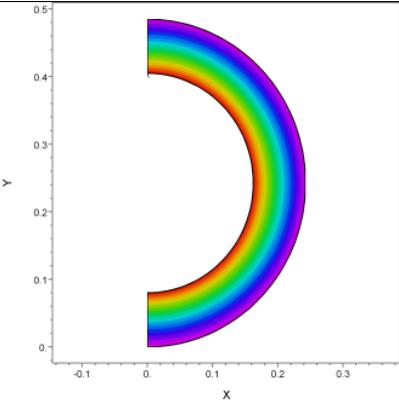
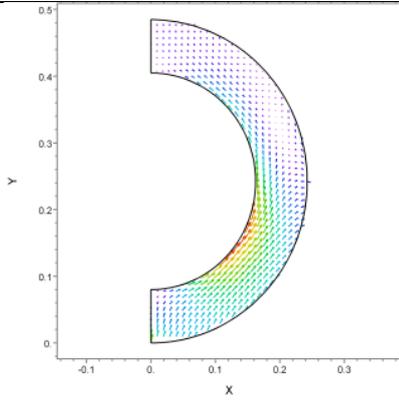
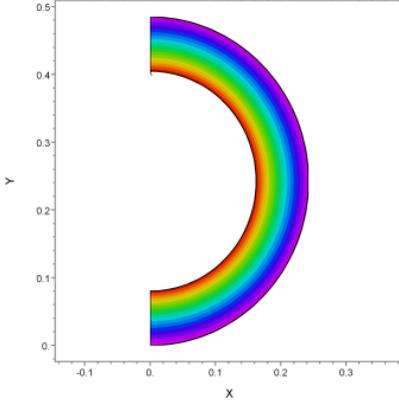
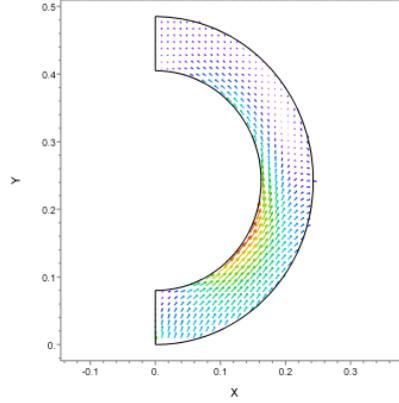
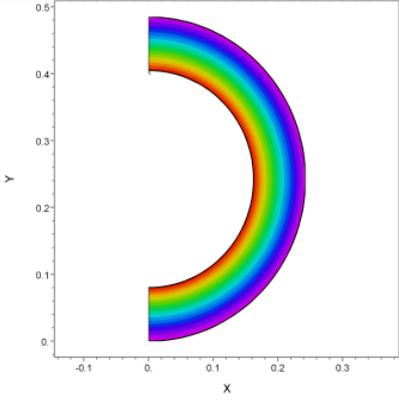
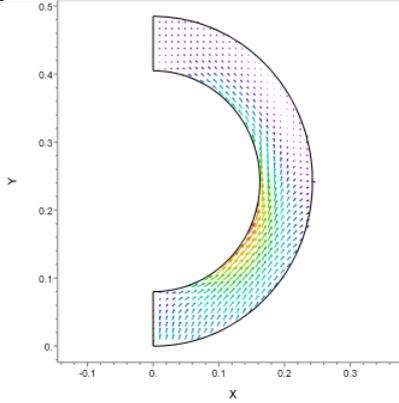
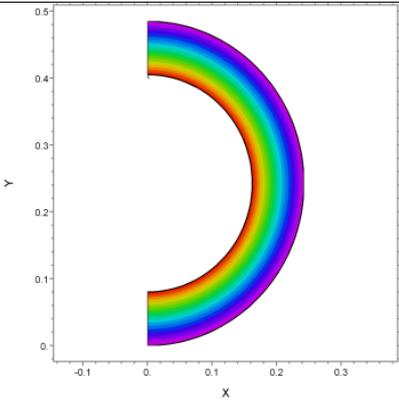
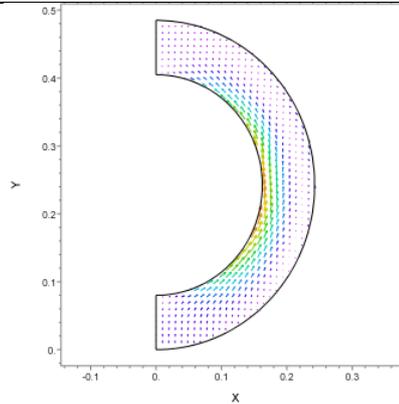


Таблица 1.7. Трубопровод диаметром 325 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $Kr_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .

|  | Распределение полей температур, °C  | Распределение скоростей, м/с   |
|--|---|--|
| Разрушенный покровный слой<br>$Kr_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$          |    |    |
| Покровный слой без покрытия<br>$Kr_2=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$         |   |   |
| Покровный слой с покрытием (1 слой)<br>$Kr_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ |  |  |
| Покровный слой с покрытием (2 слоя)<br>$Kr_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ |  |  |

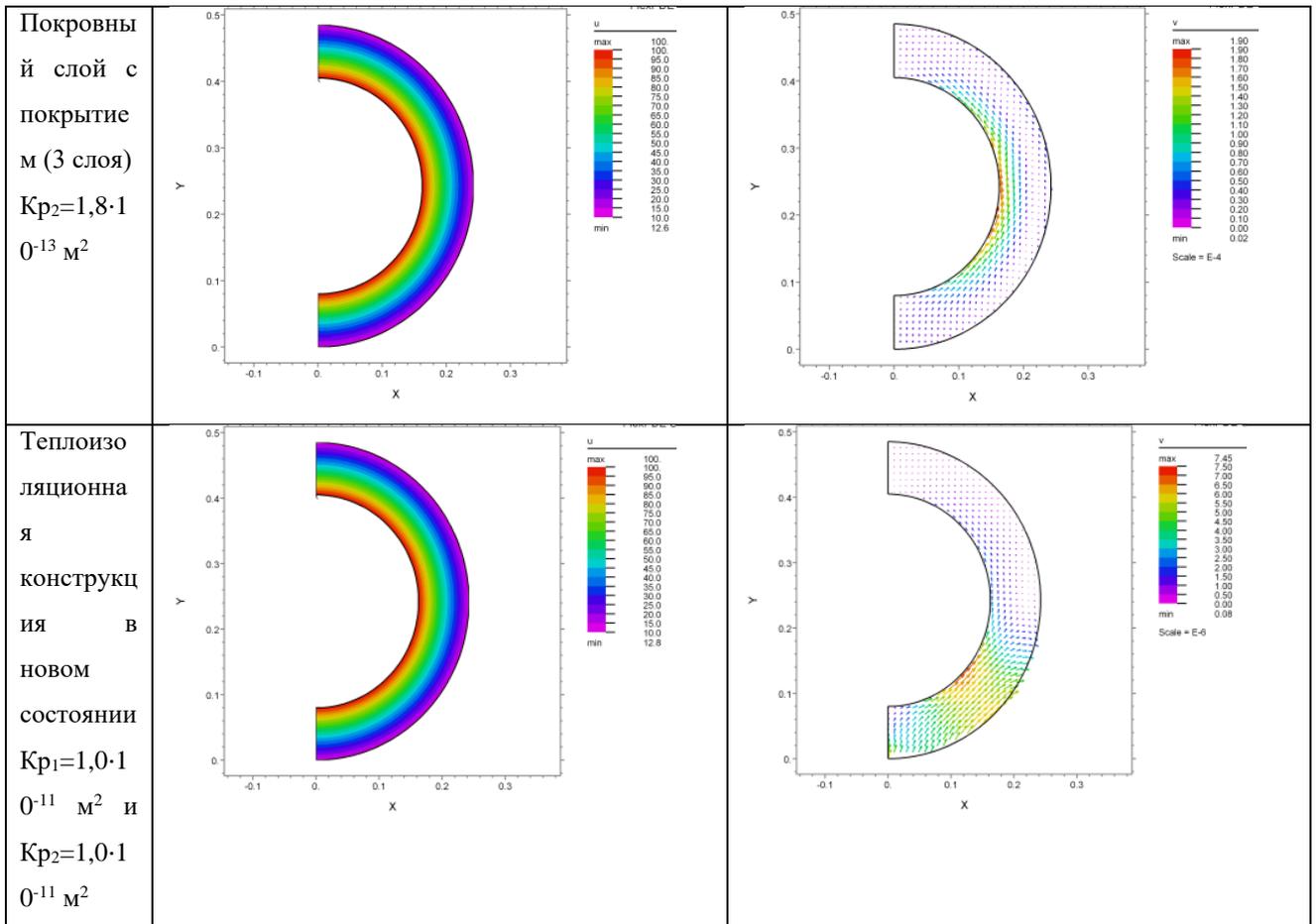
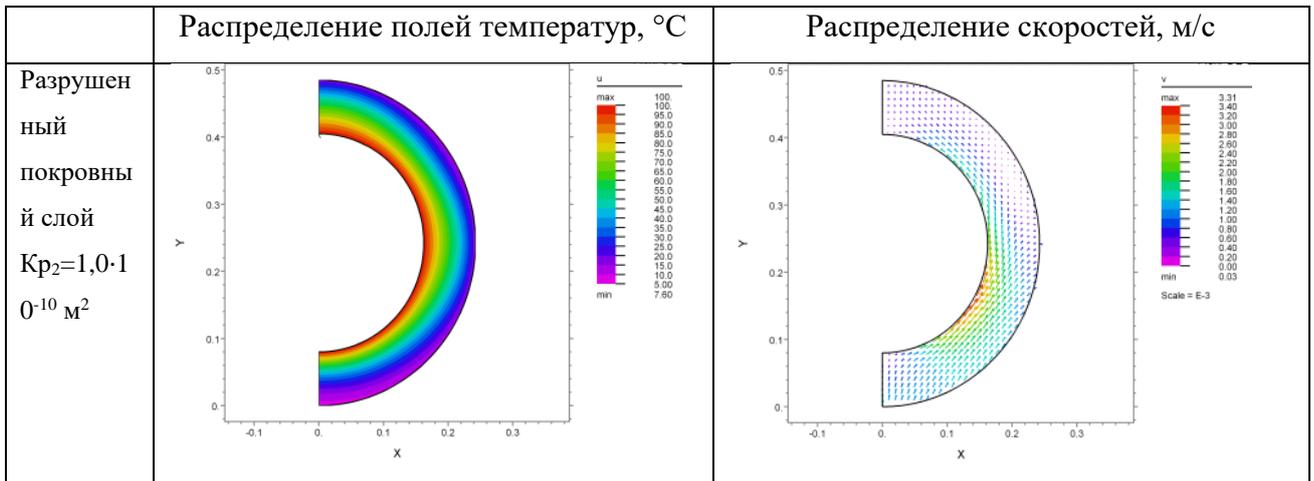
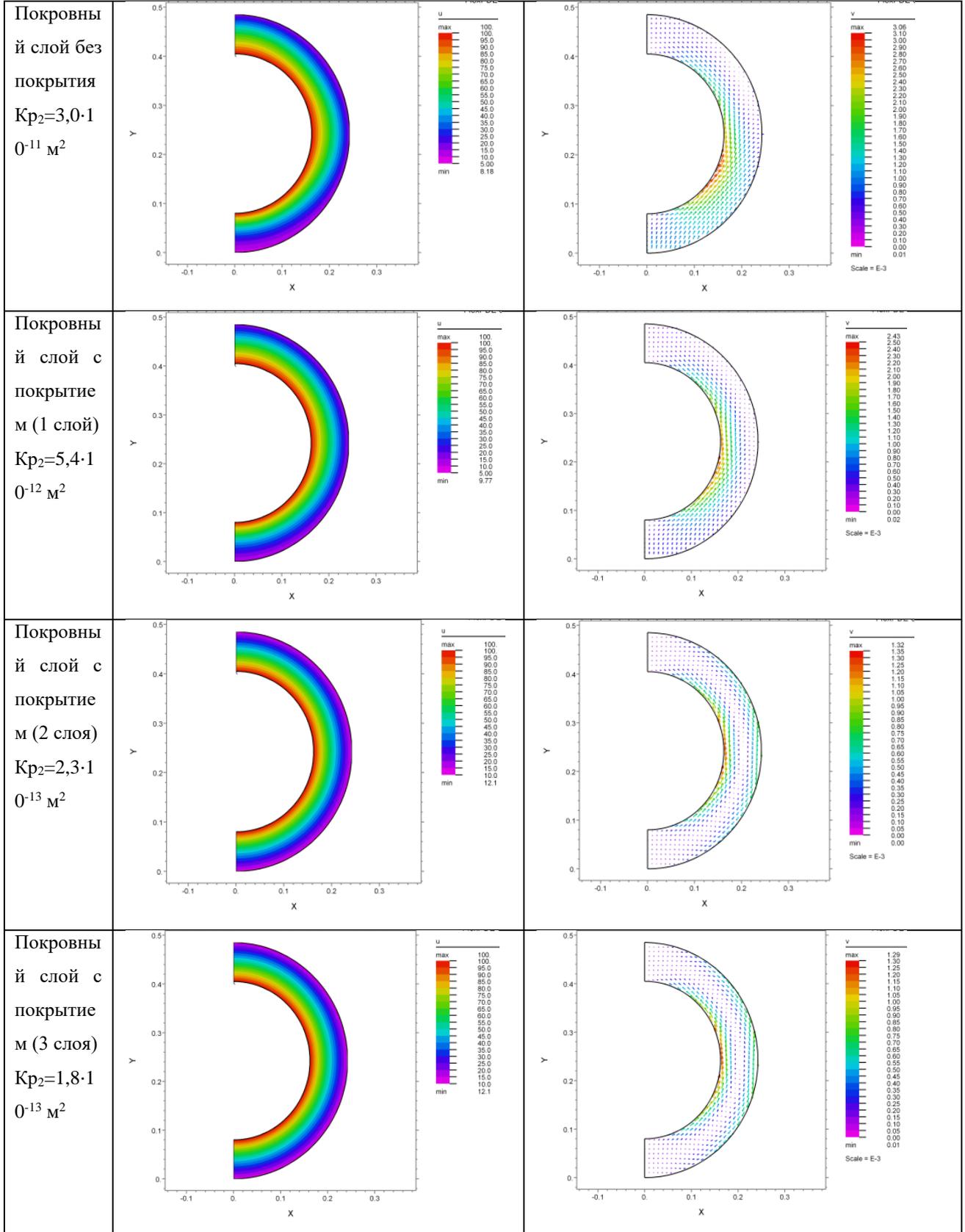


Таблица 1.8. Трубопровод диаметром 325 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .





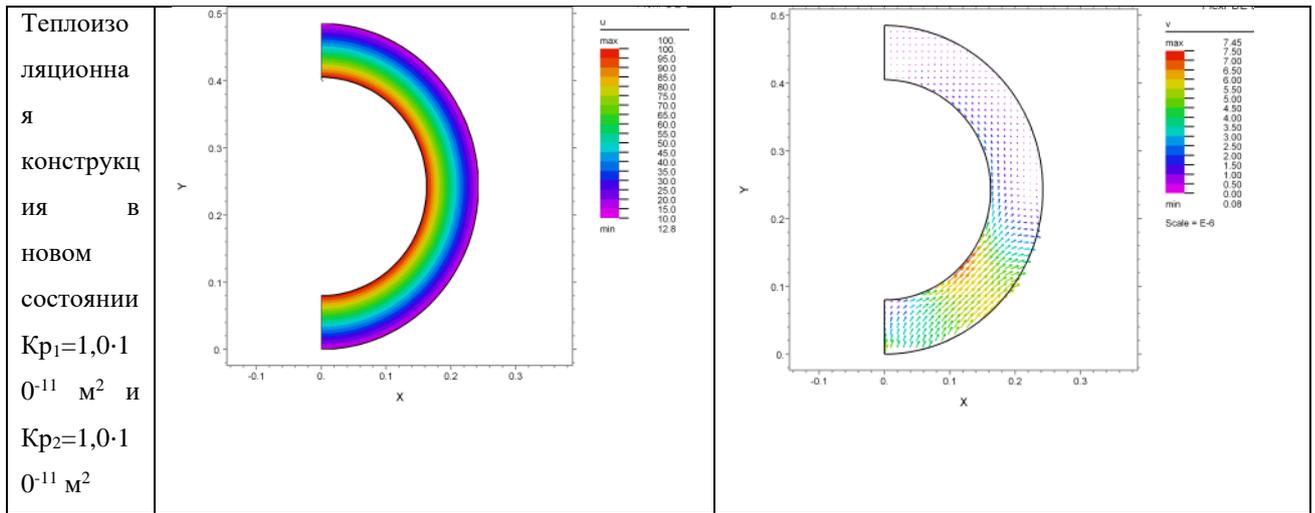
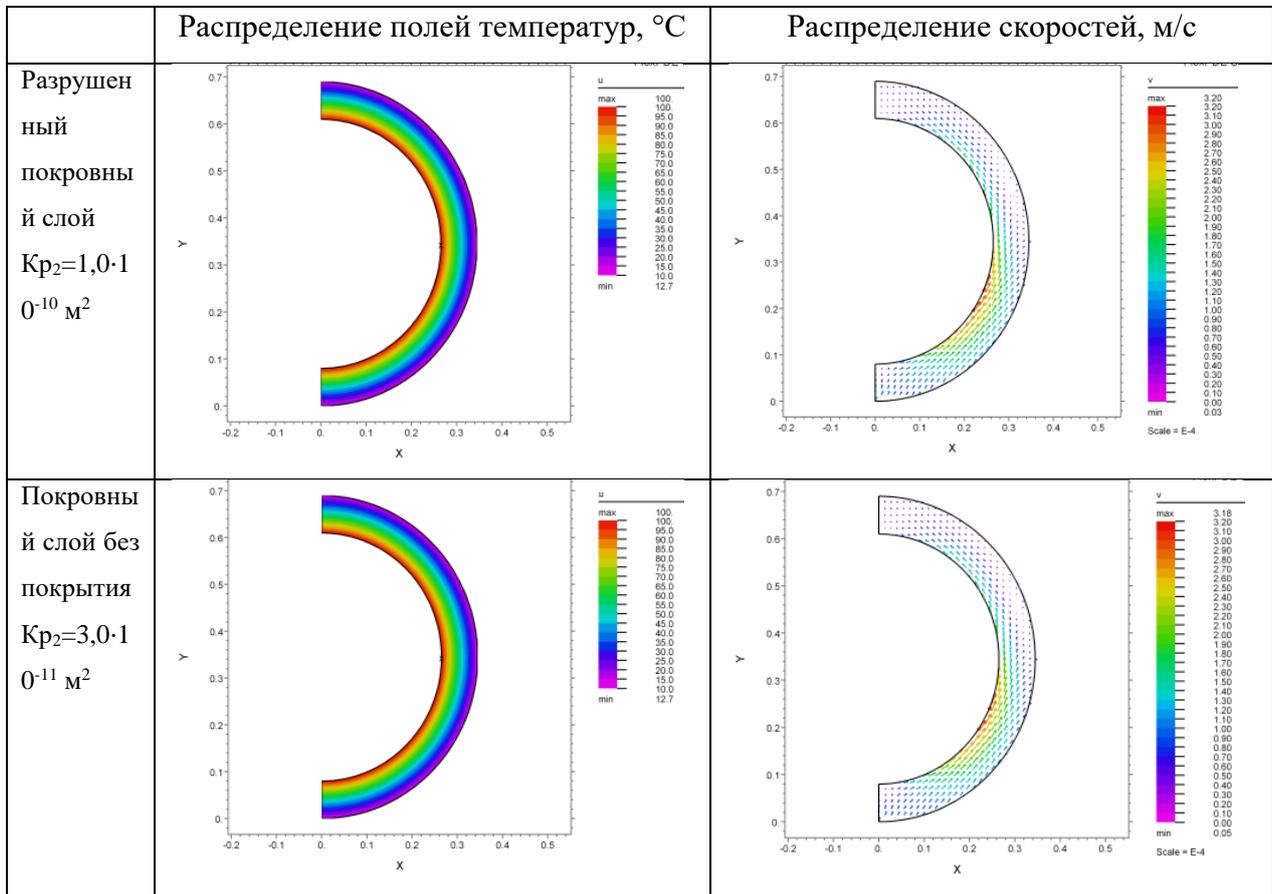


Таблица 1.9. Трубопровод диаметром 530 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .



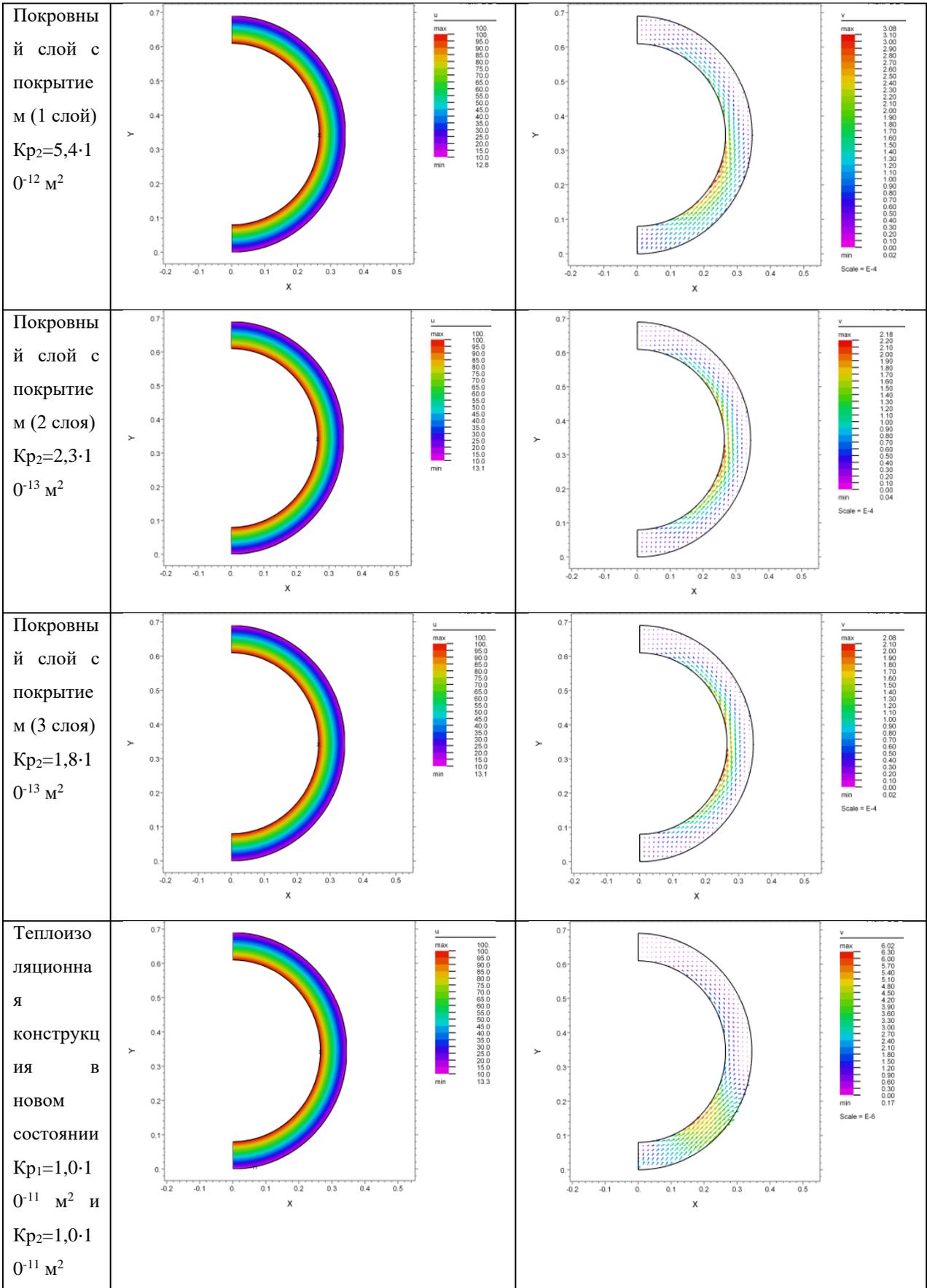
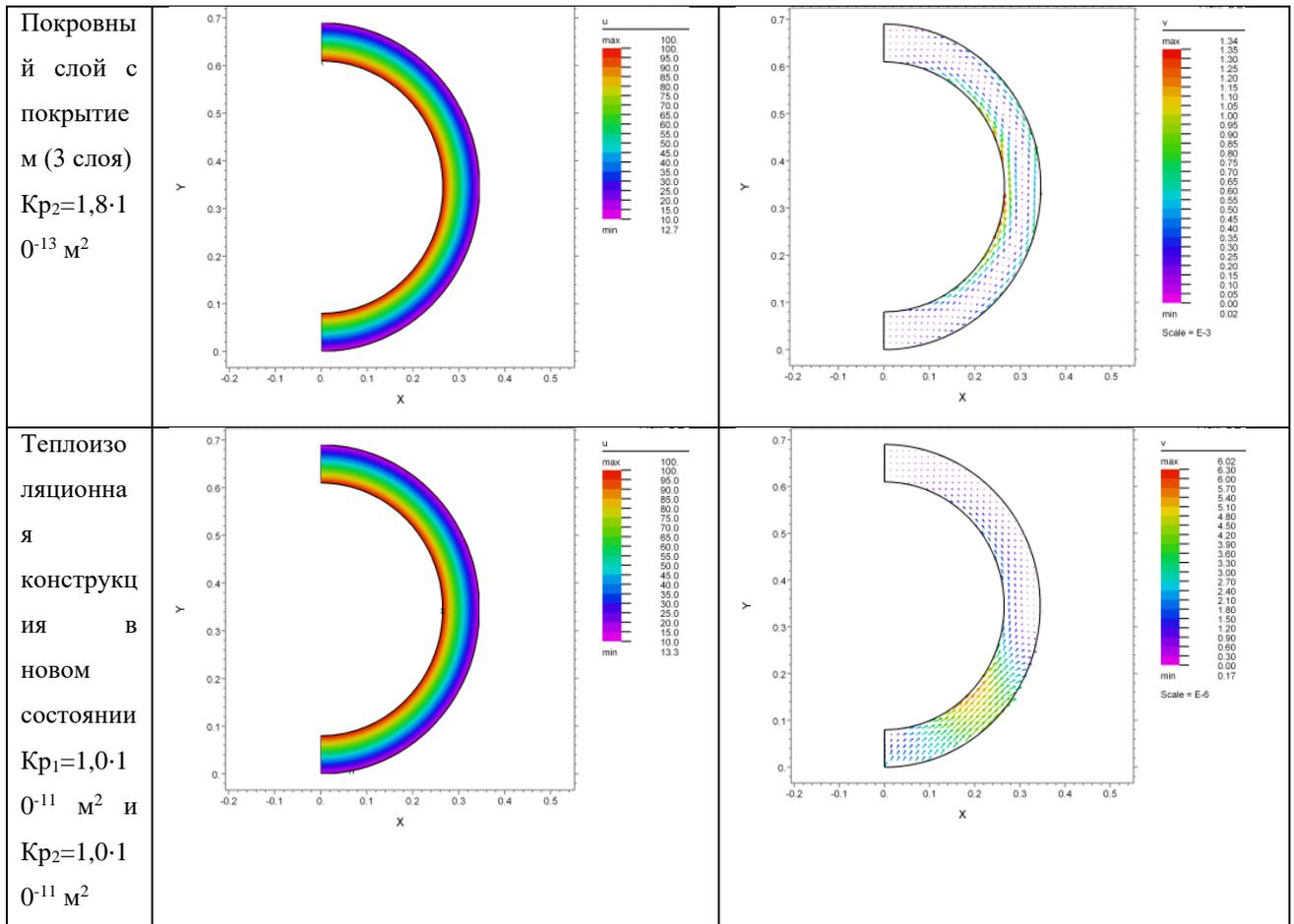


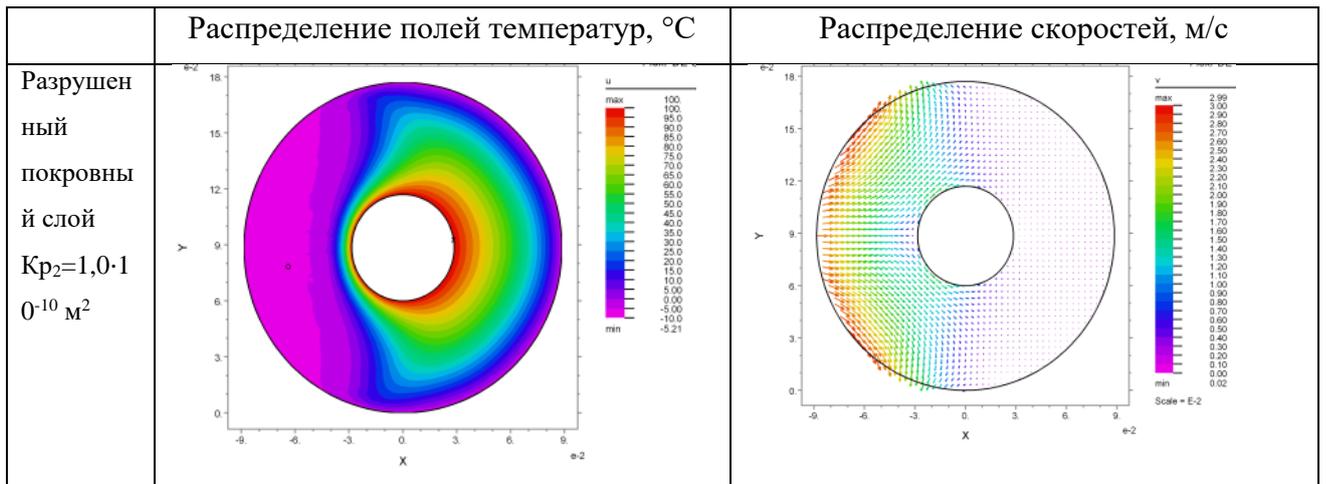
Таблица 1.10. Трубопровод диаметром 530 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $Kr_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .

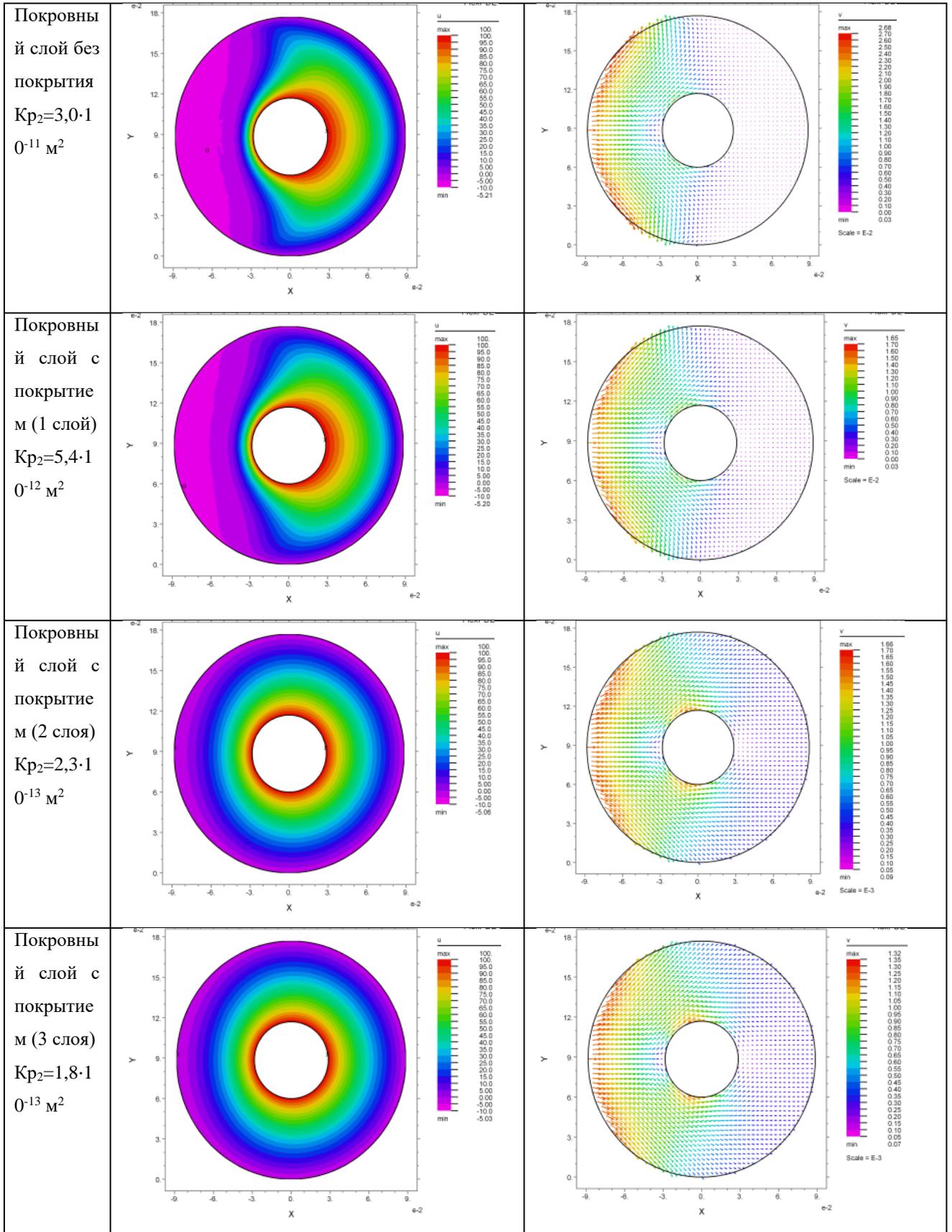
|   | Распределение полей температур, °С | Распределение скоростей, м/с |
|---|------------------------------------|------------------------------|
| Разрушен<br>ный<br>покровны<br>й слой<br>$Kr_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$          |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой без<br>покрытия<br>$Kr_2=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$             |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (1 слой)<br>$Kr_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (2 слоя)<br>$Kr_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ |                                    |                              |



2. Обтекание в условиях вынужденной конвекции на открытом воздухе

Таблица 2.1. Трубопровод диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $Kr_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .





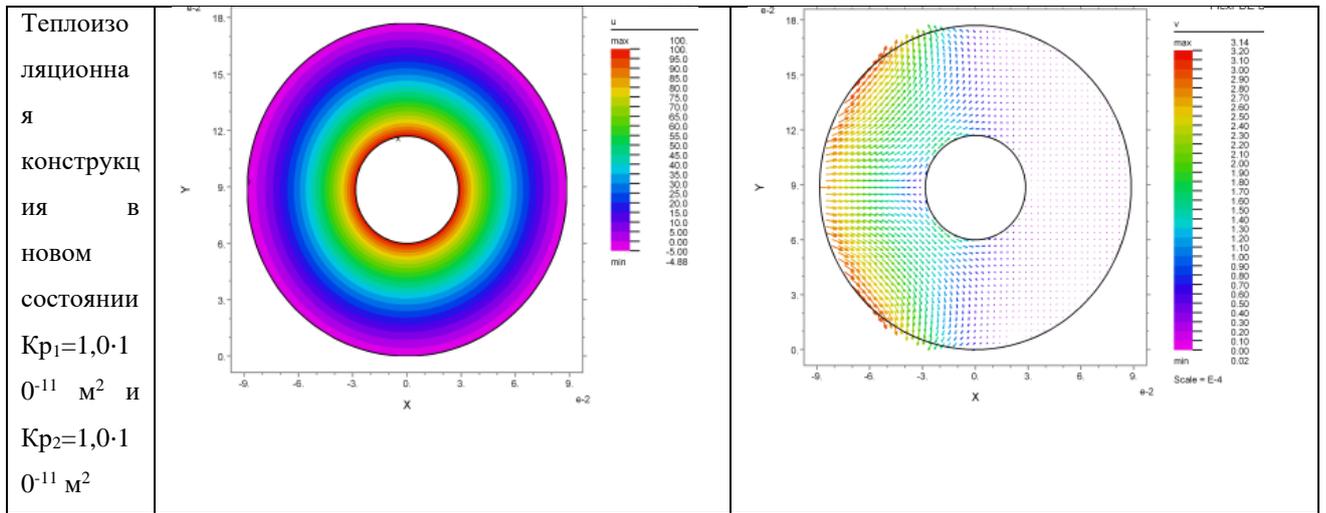
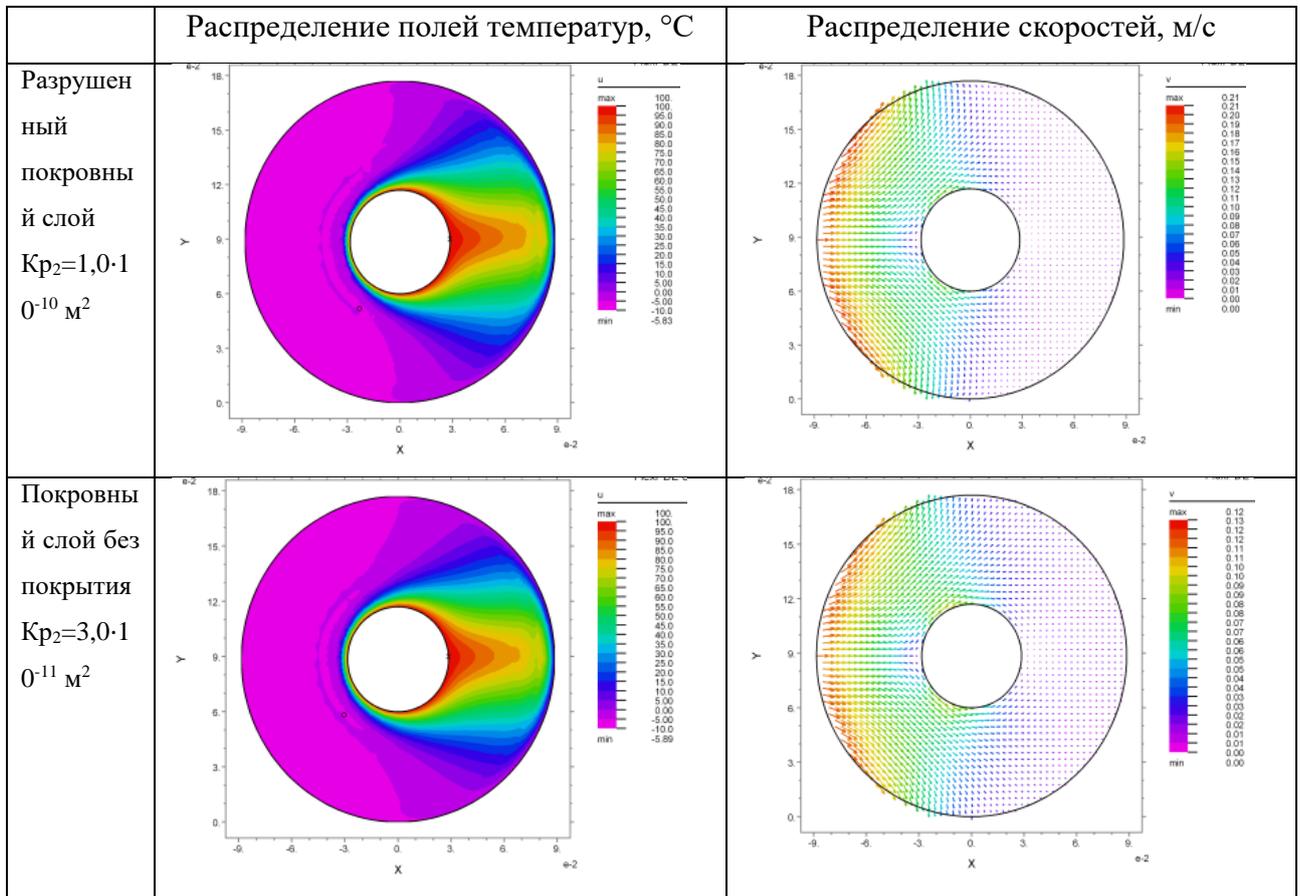


Таблица 2.2. Трубопровод диаметром 57 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .



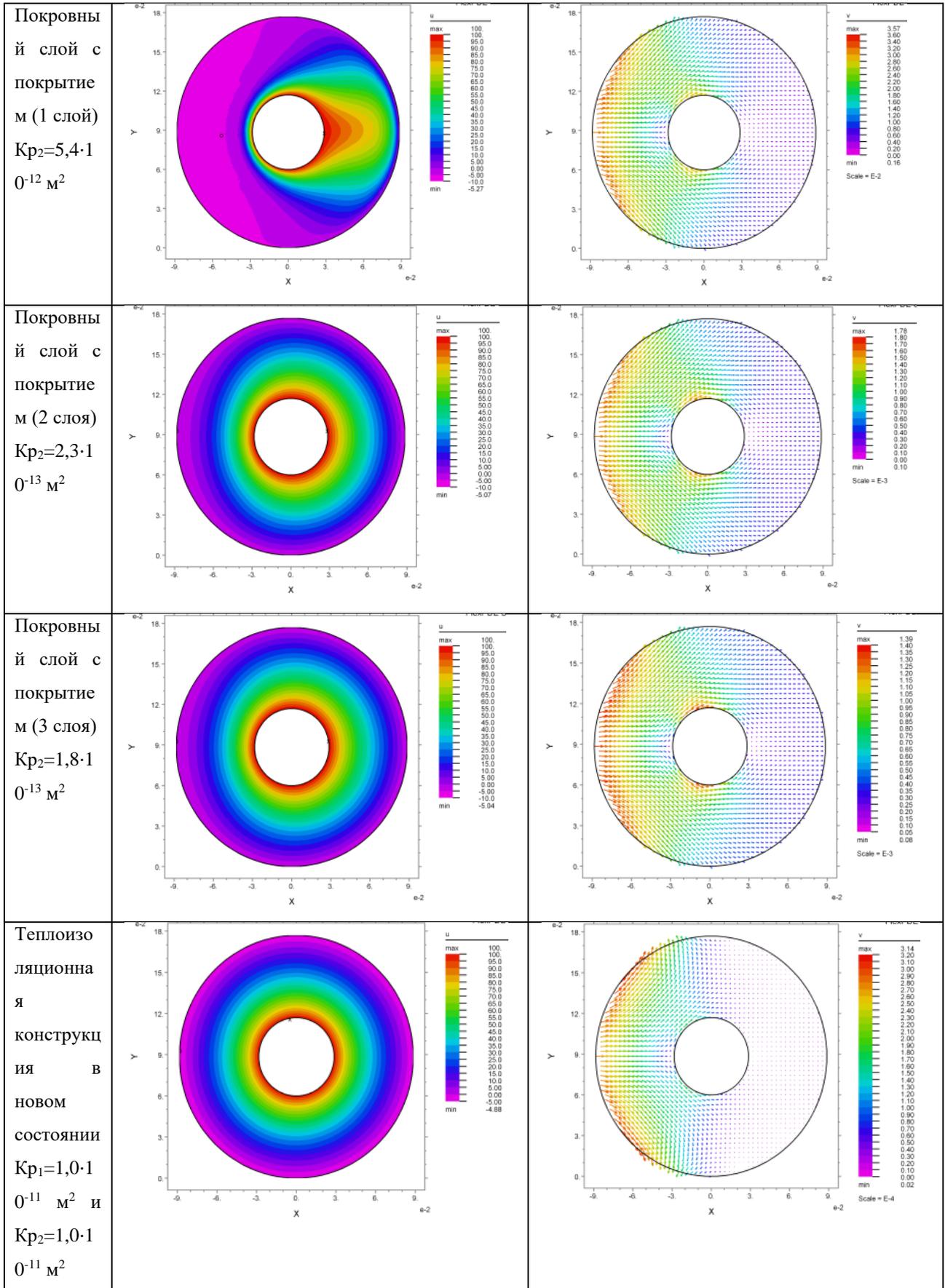
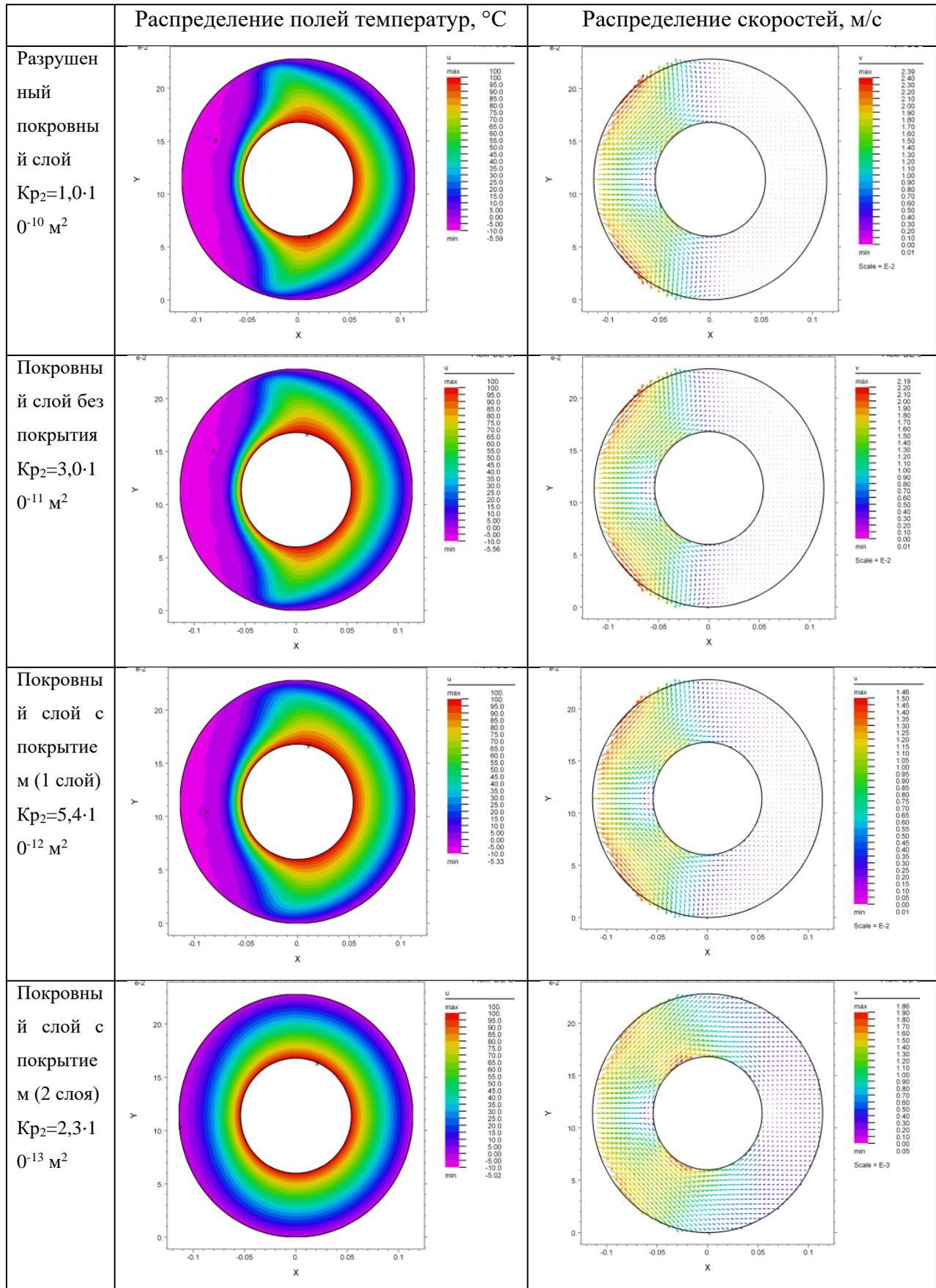


Таблица 2.3. Трубопровод диаметром 108 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $Kr_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .



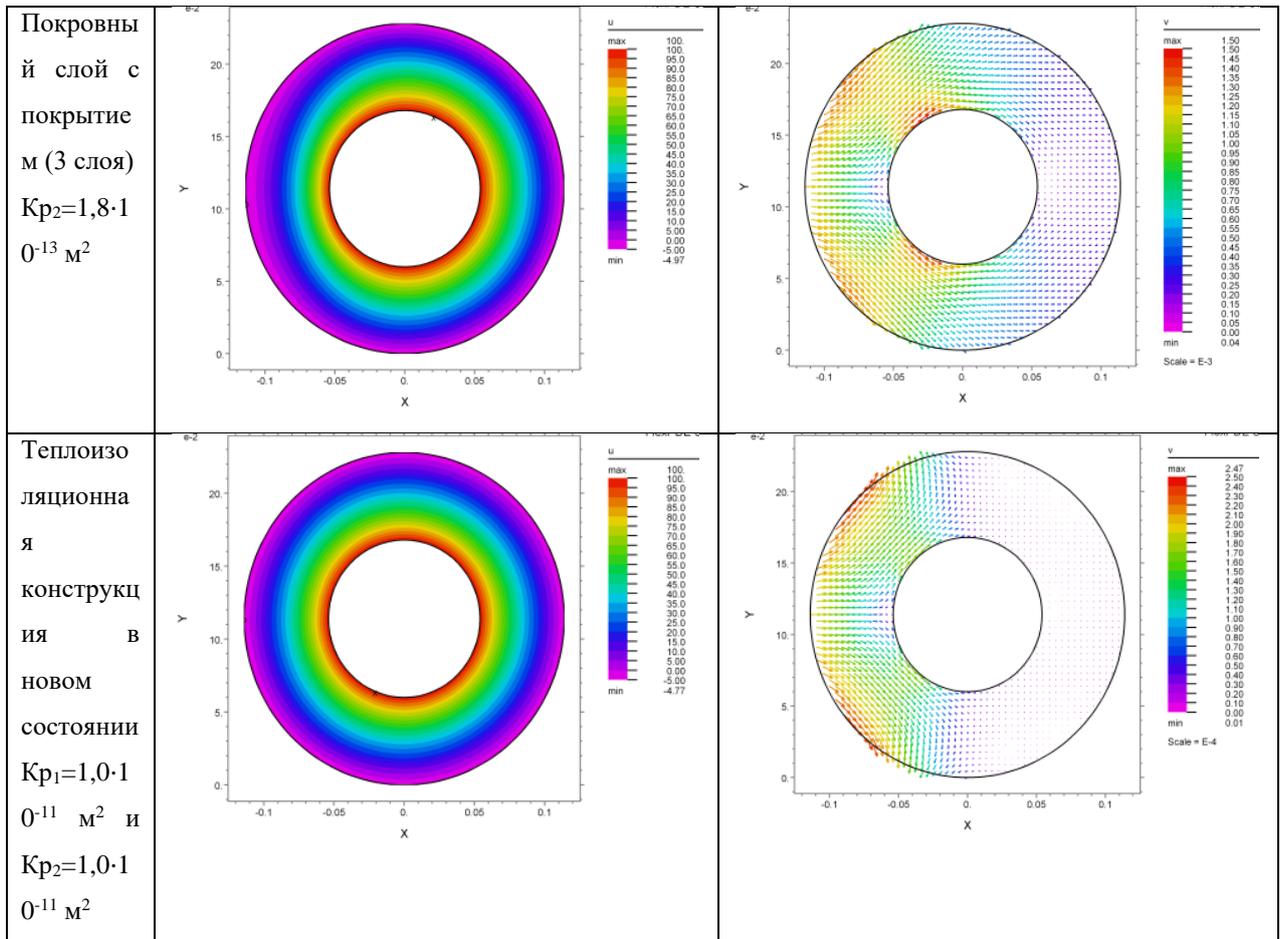
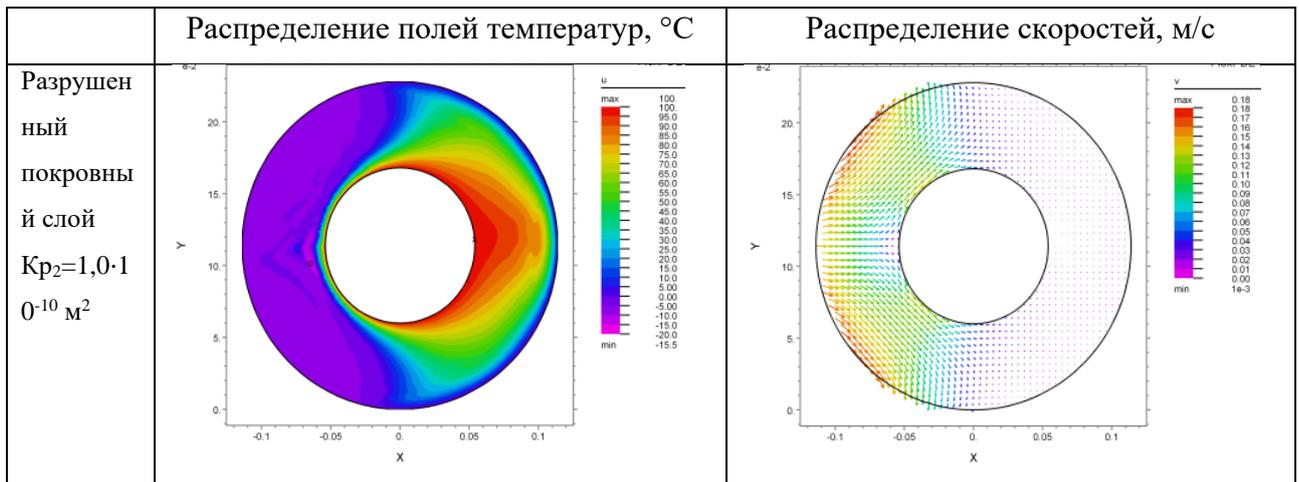
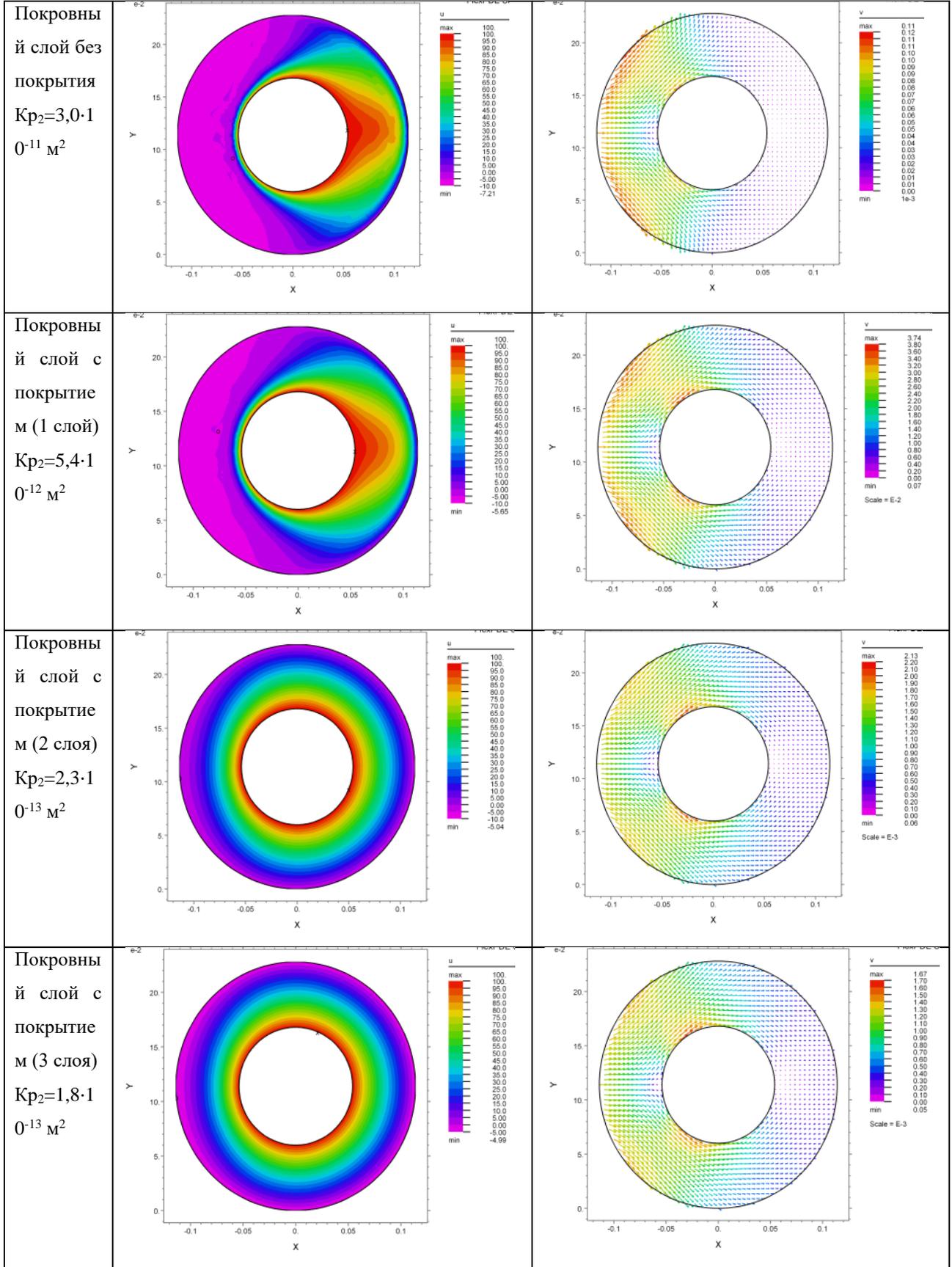


Таблица 2.4. Трубопровод диаметром 108 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $Kr_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .





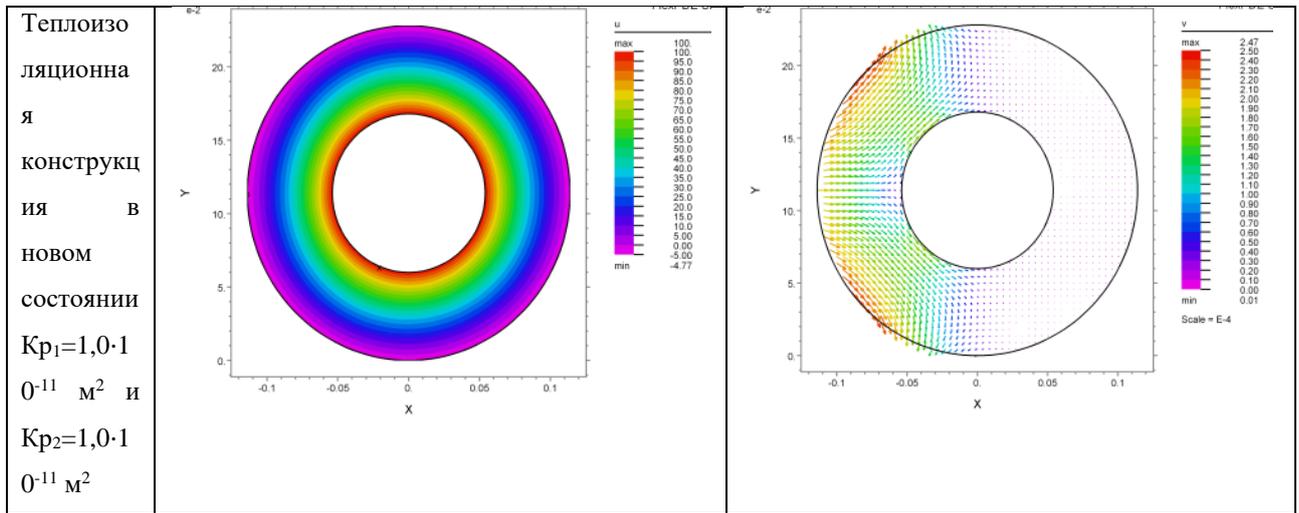
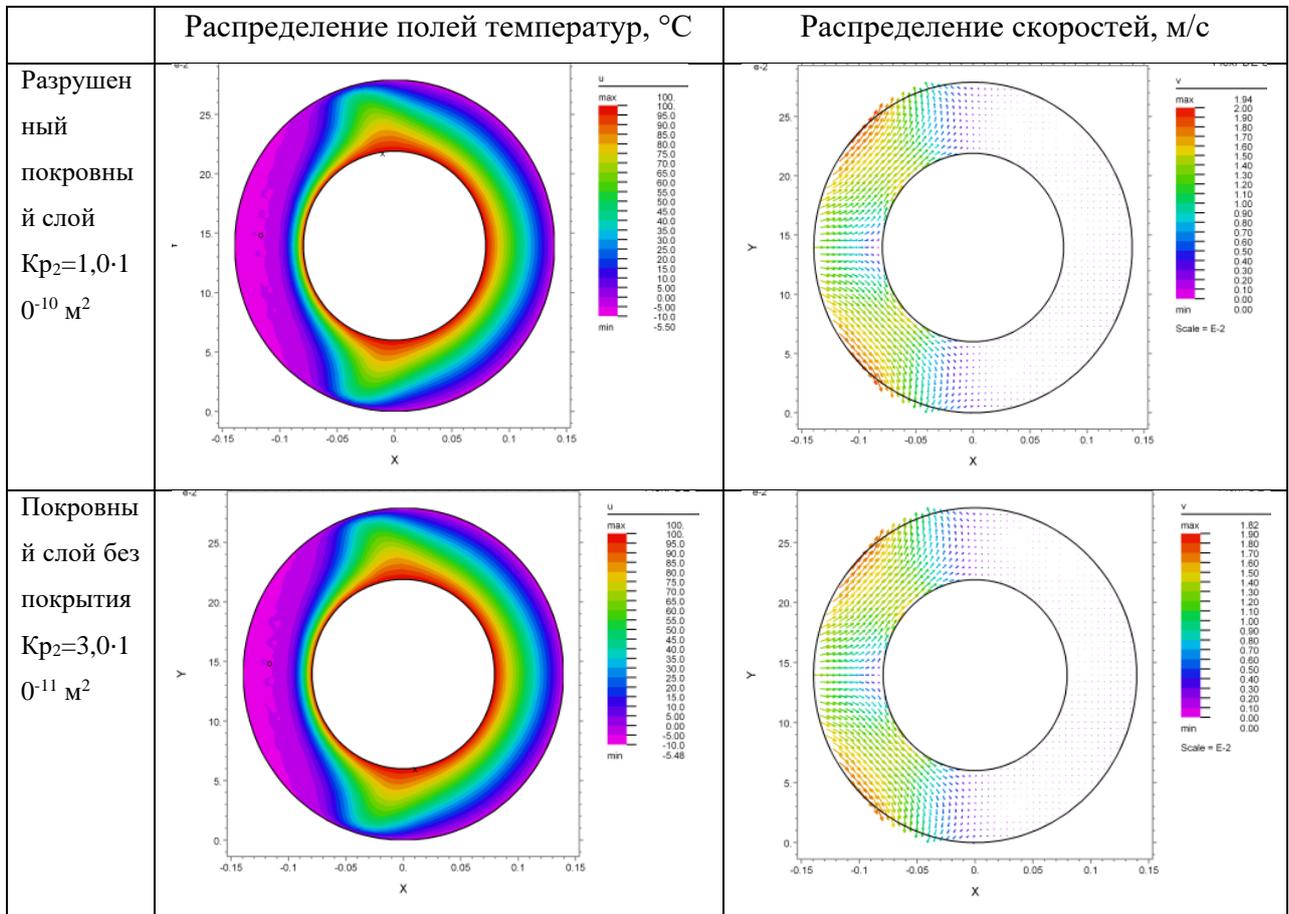


Таблица 2.5. Трубопровод диаметром 159 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .



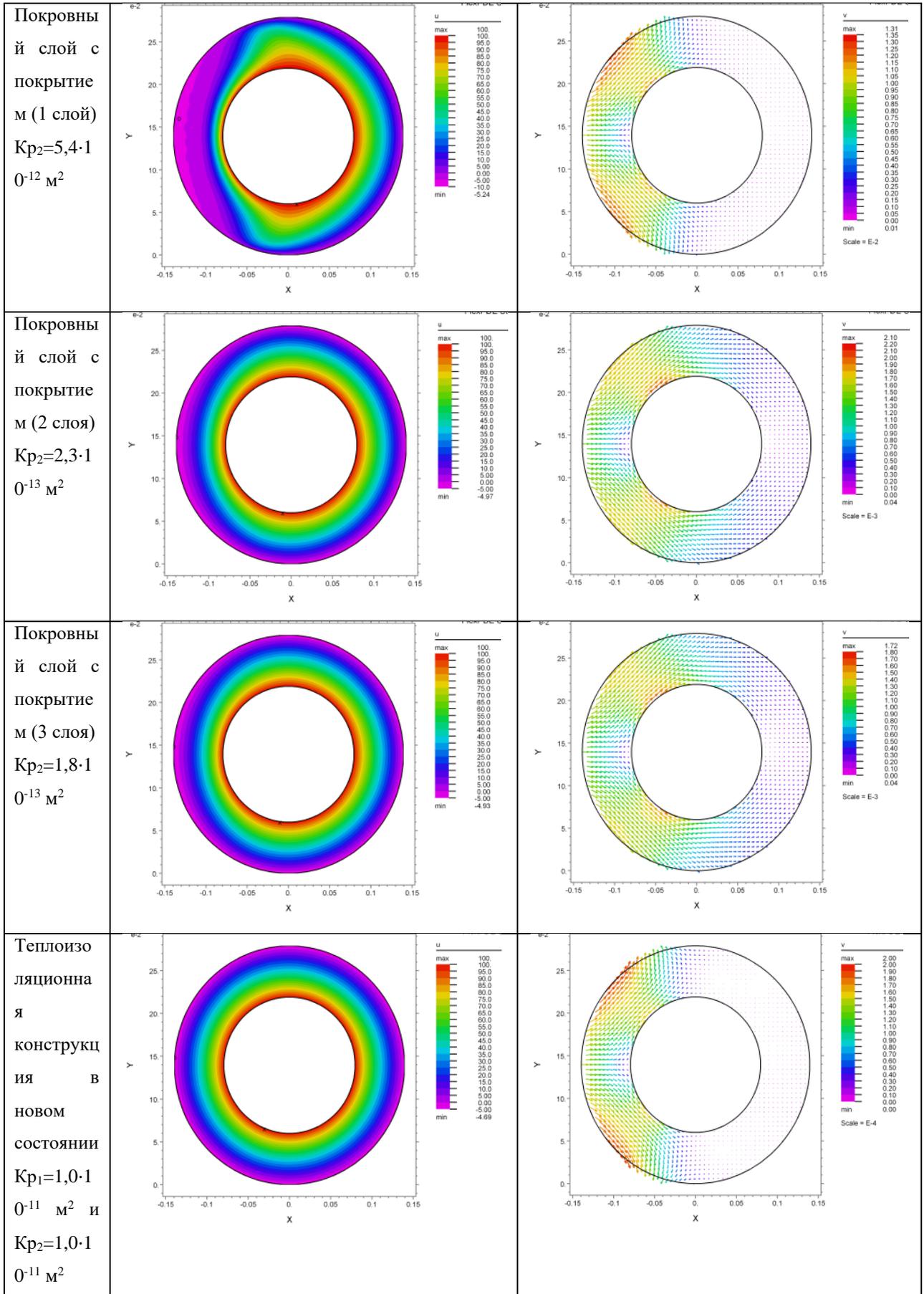
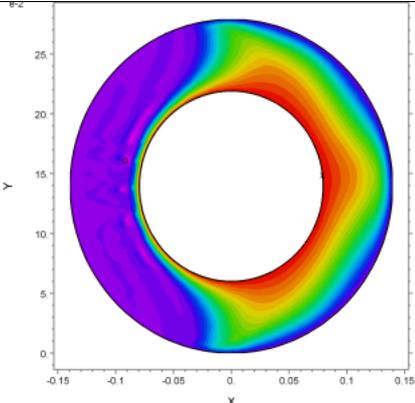
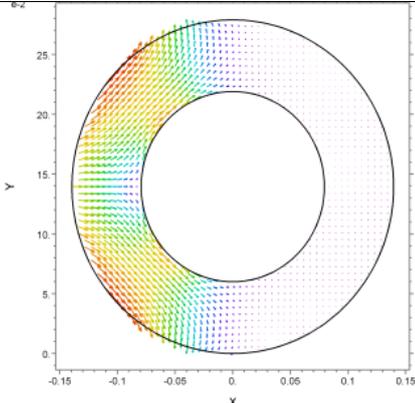
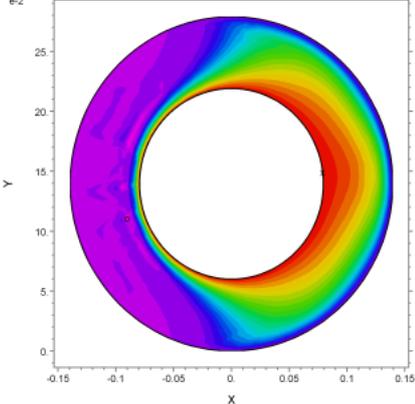
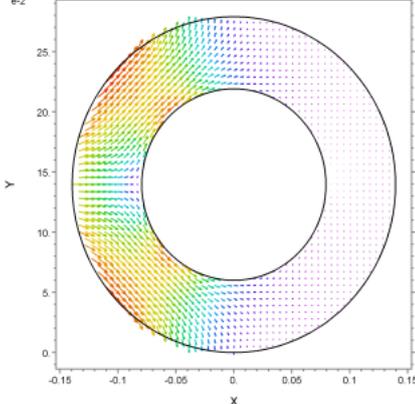
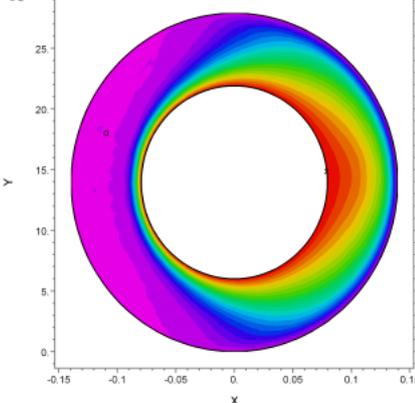
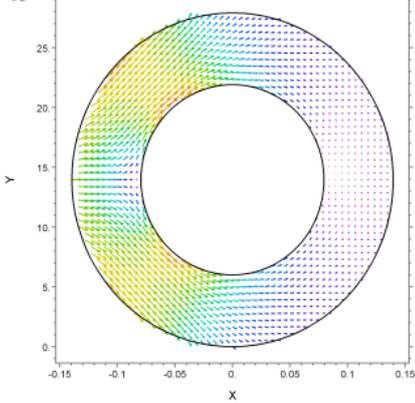
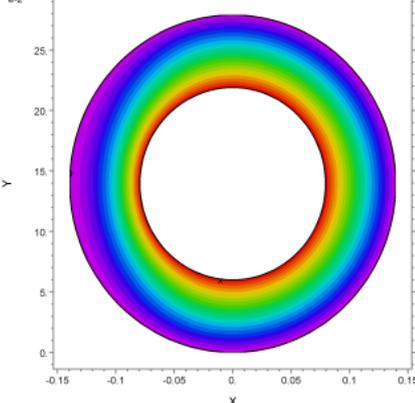
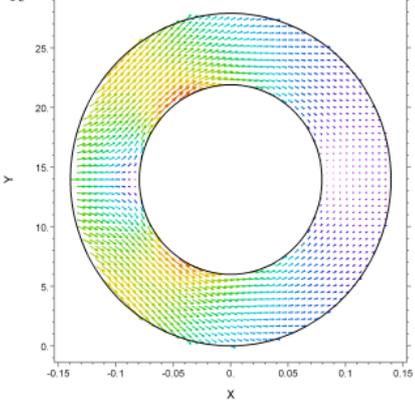


Таблица 2.6. Трубопровод диаметром 159 мм с толщиной изоляционного слоя 60 мм при  $Kr_1=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .

|   | Распределение полей температур, °С  | Распределение скоростей, м/с   |
|---|---|--|
| Разрушен<br>ный<br>покровны<br>й слой<br>$Kr_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$          |    |    |
| Покровны<br>й слой без<br>покрытия<br>$Kr_2=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$             |   |   |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (1 слой)<br>$Kr_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ |  |  |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (2 слоя)<br>$Kr_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ |  |  |

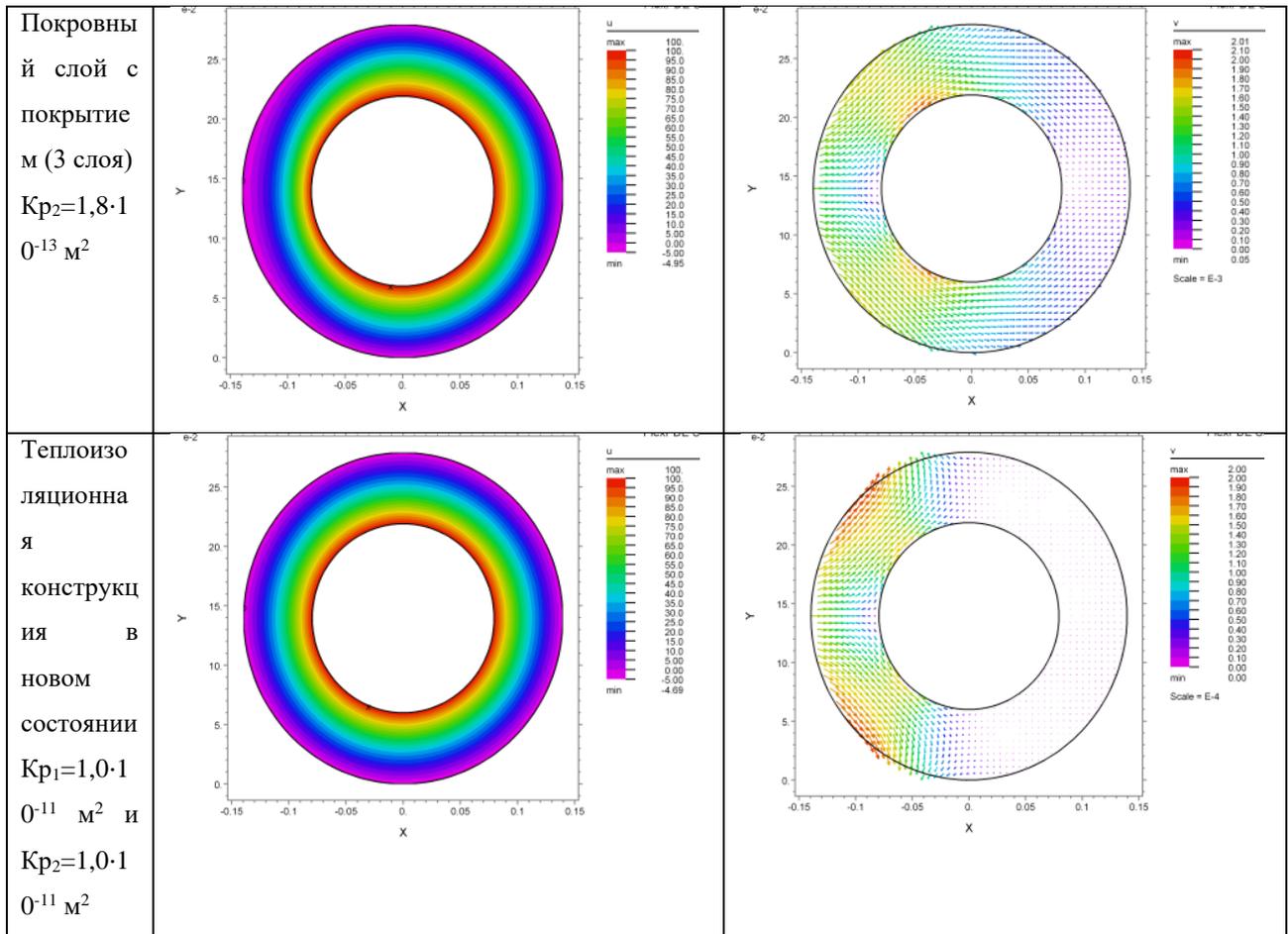
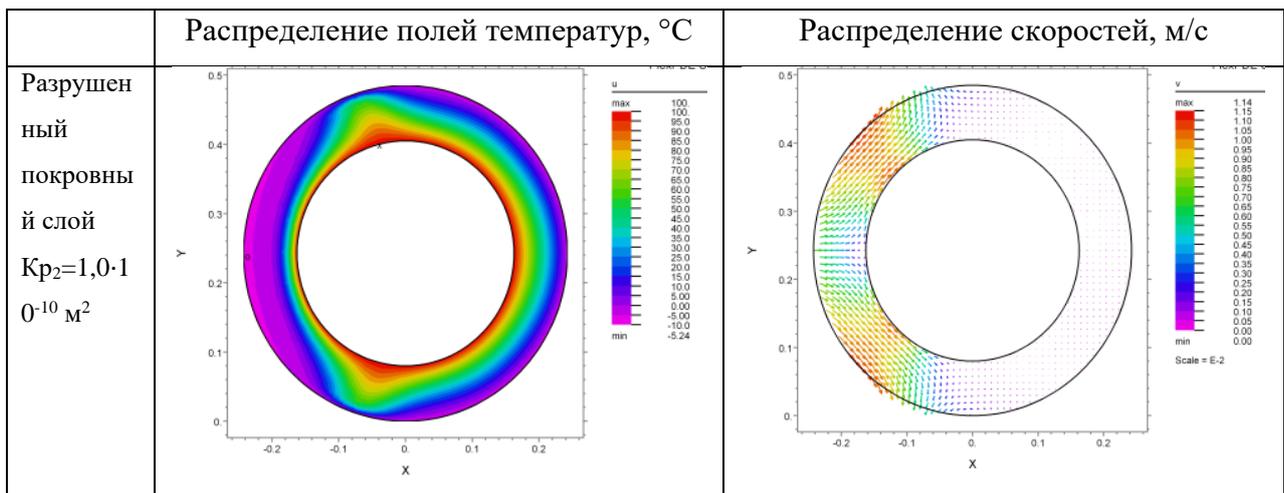
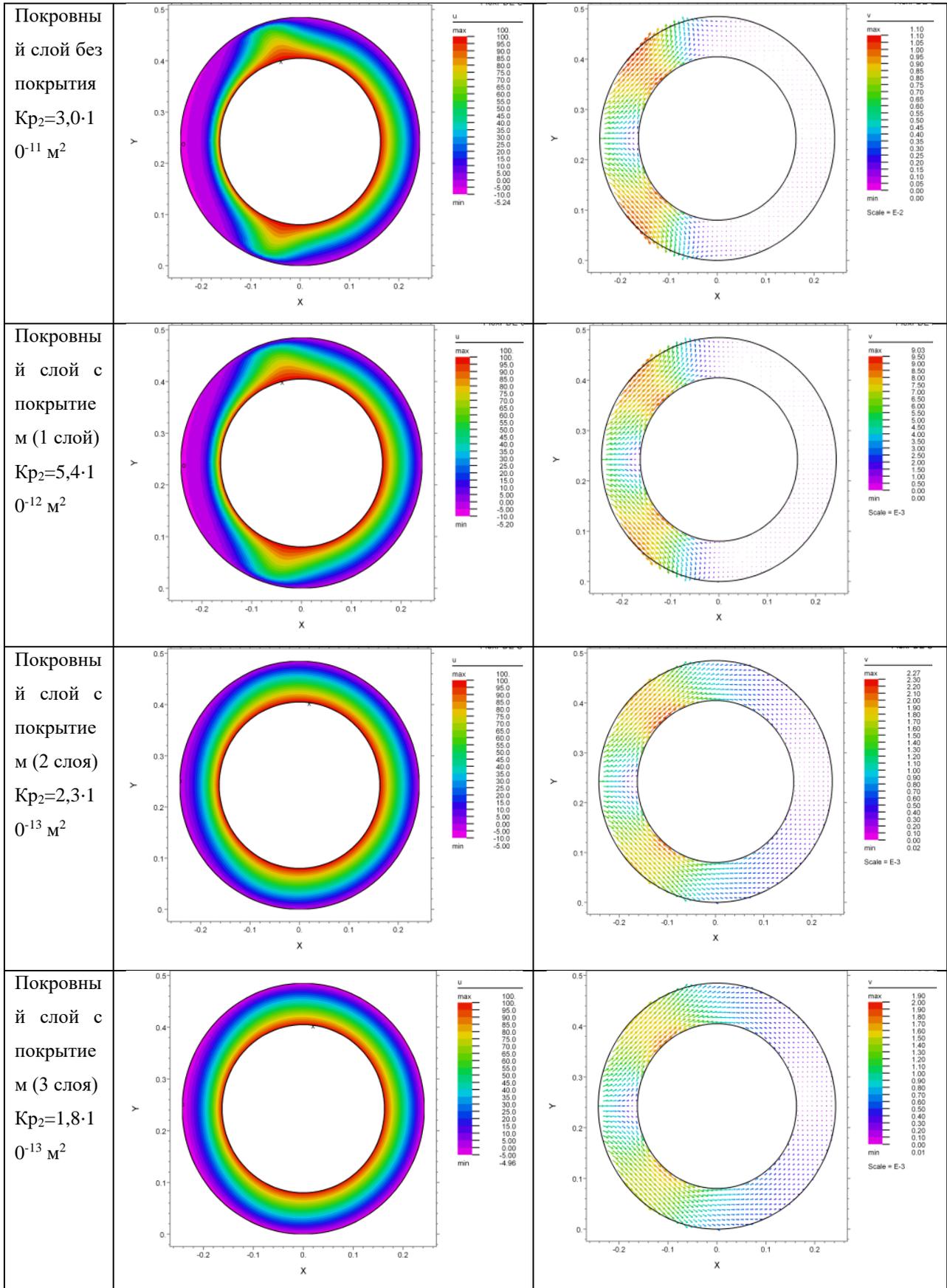


Таблица 2.7. Трубопровод диаметром 325 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .





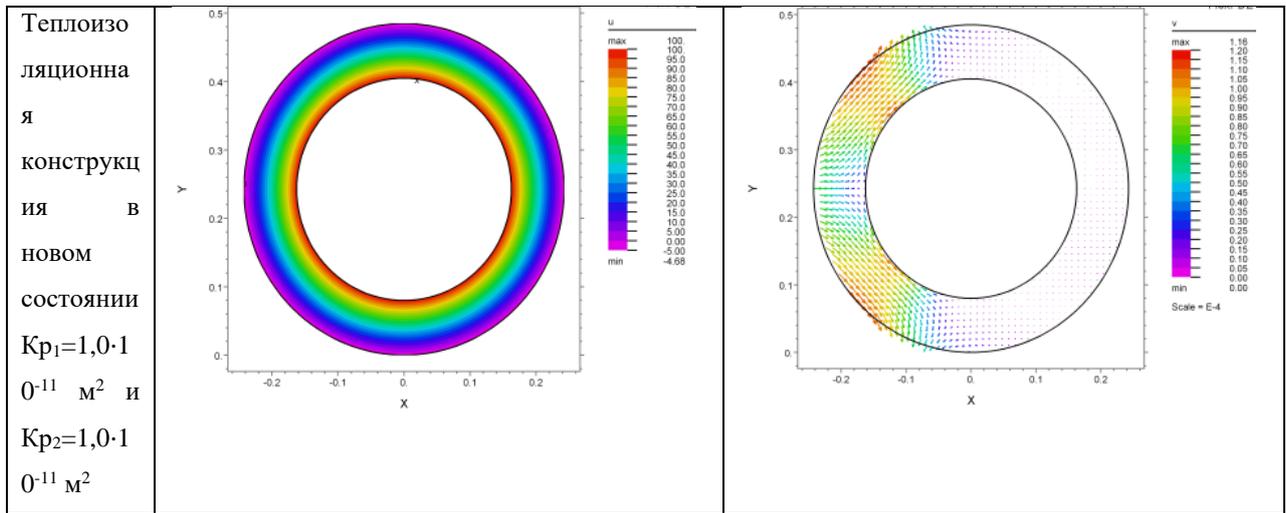
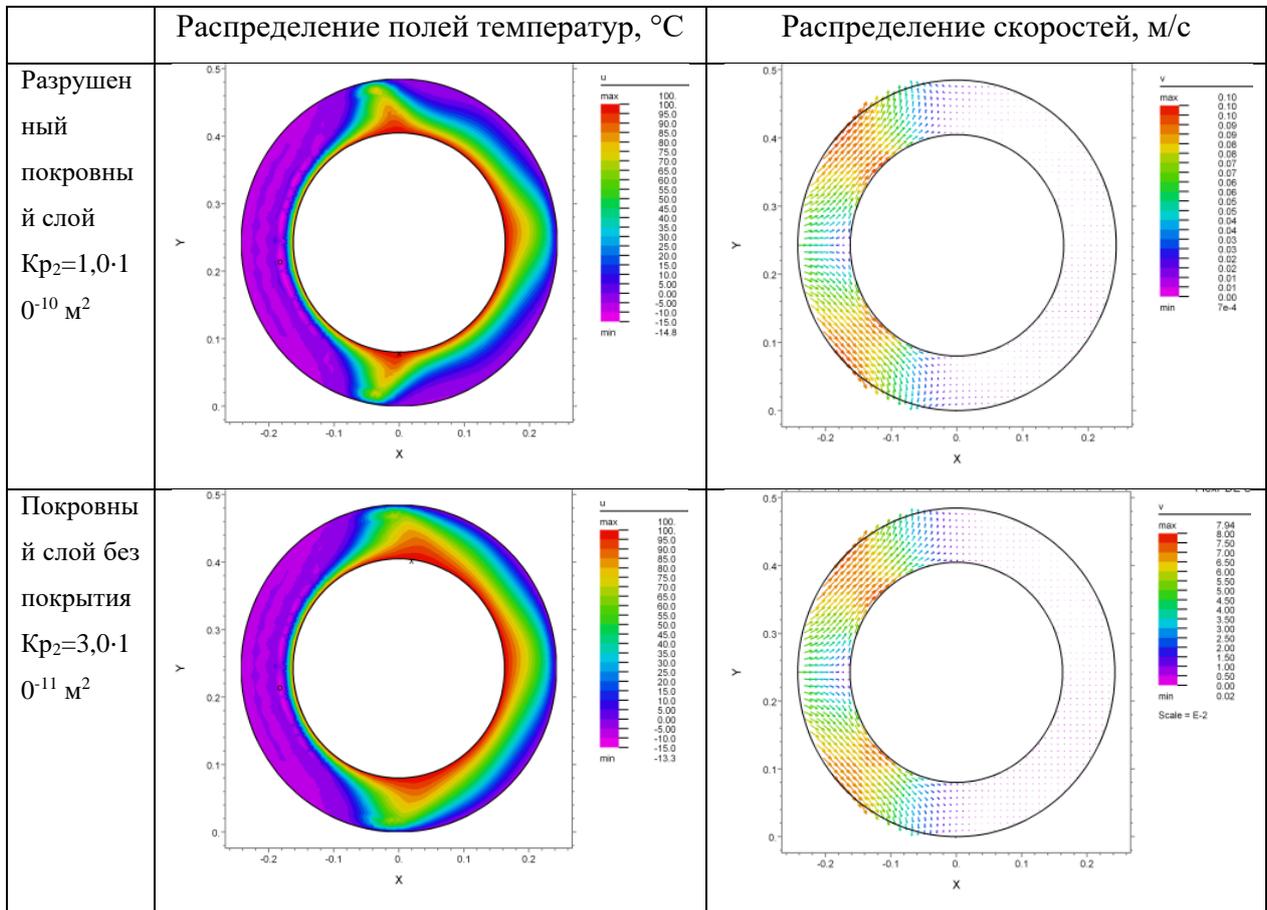


Таблица 2.8. Трубопровод диаметром 325 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .



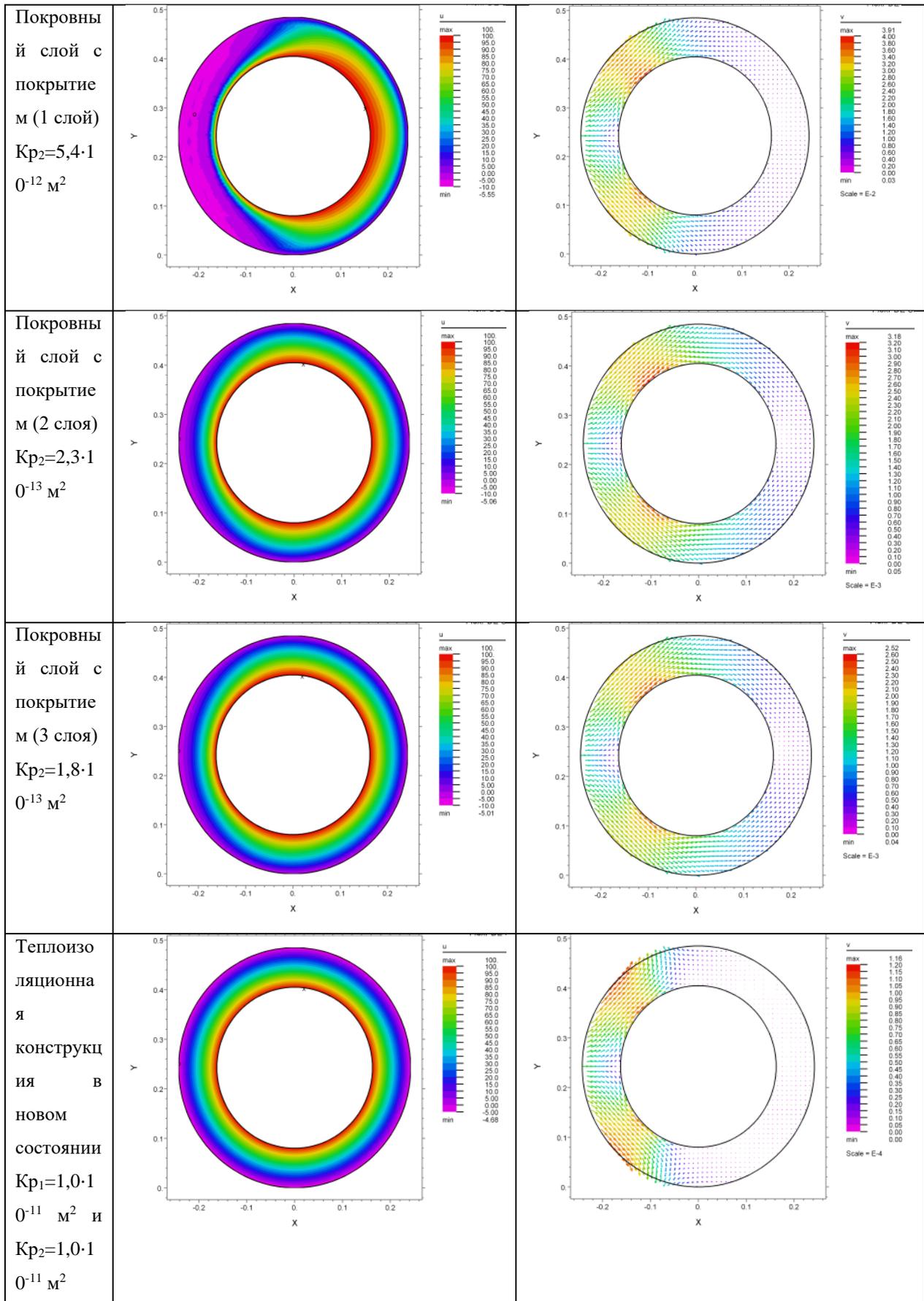


Таблица 2.9. Трубопровод диаметром 530 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $Kr_1=1,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ .

|   | Распределение полей температур, °C | Распределение скоростей, м/с |
|---|------------------------------------|------------------------------|
| Разрушен<br>ный<br>покровны<br>й слой<br>$Kr_2=1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2$          |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой без<br>покрытия<br>$Kr_2=3,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$             |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (1 слой)<br>$Kr_2=5,4 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2$ |                                    |                              |
| Покровны<br>й слой с<br>покрытие<br>м (2 слоя)<br>$Kr_2=2,3 \cdot 10^{-13} \text{ м}^2$ |                                    |                              |

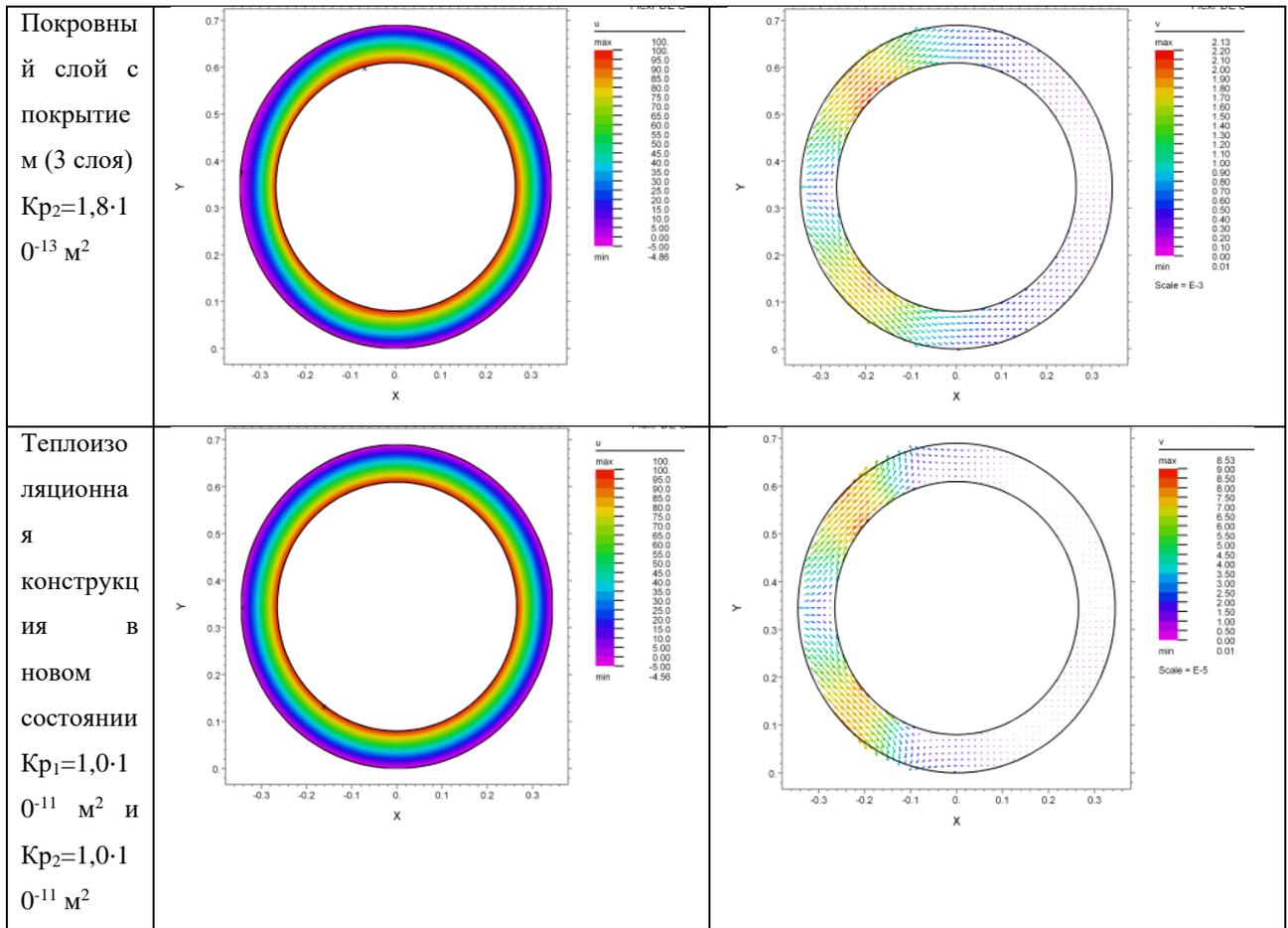
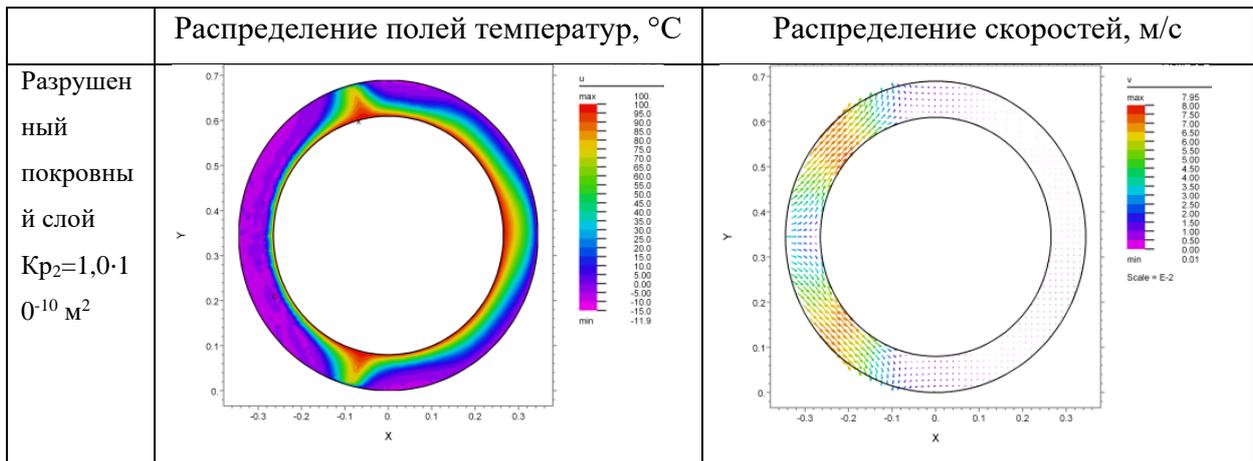
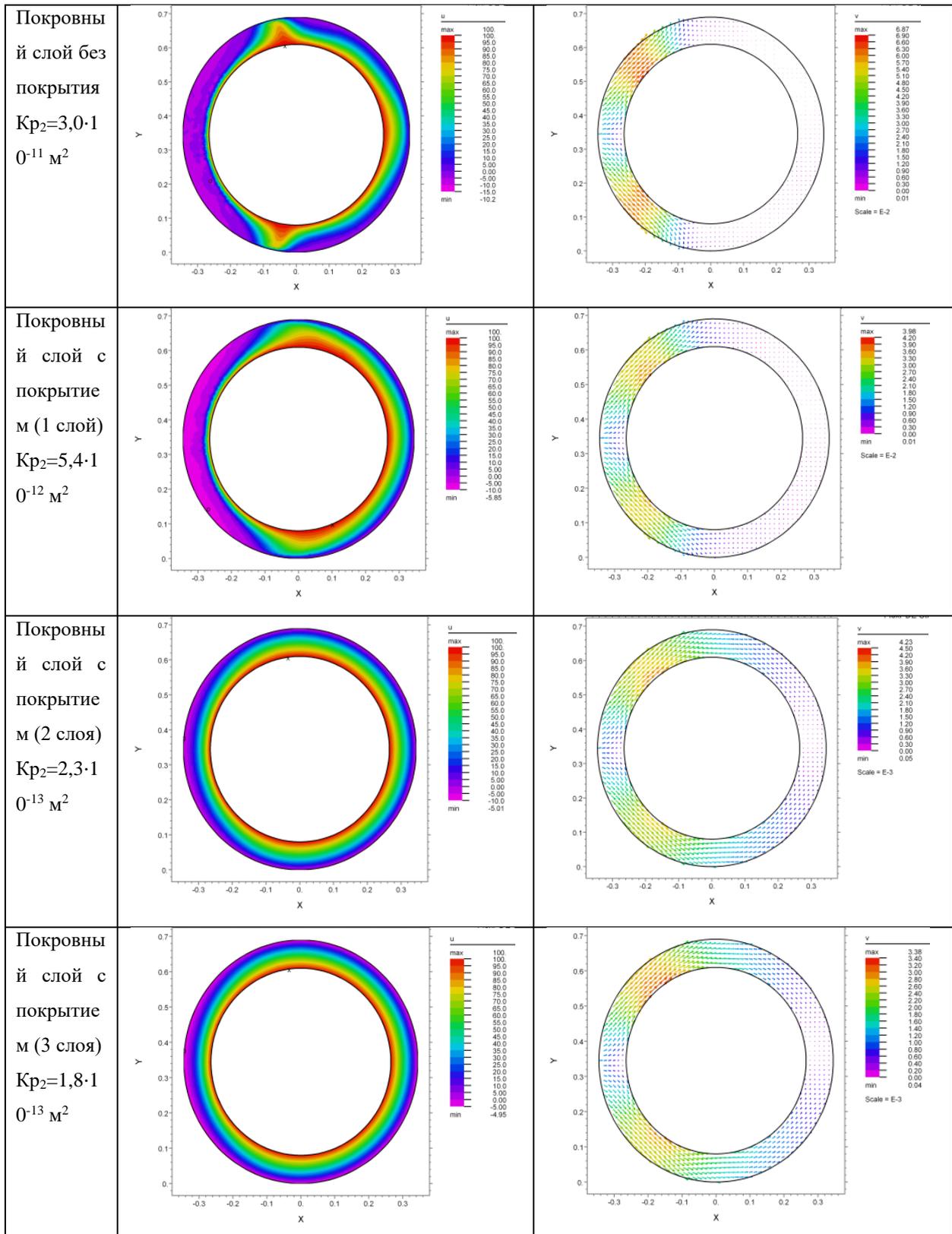


Таблица 2.10. Трубопровод диаметром 530 мм с толщиной изоляционного слоя 80 мм при  $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ .





Теплоизо-  
ляционная  
я  
конструкц  
ия в  
новом  
состоянии  
 $K_{p1}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$  и  
 $K_{p2}=1,0 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2$

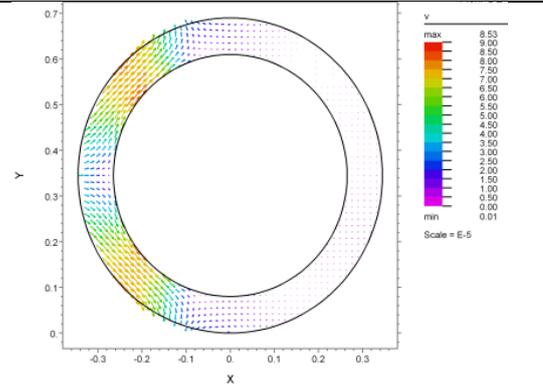
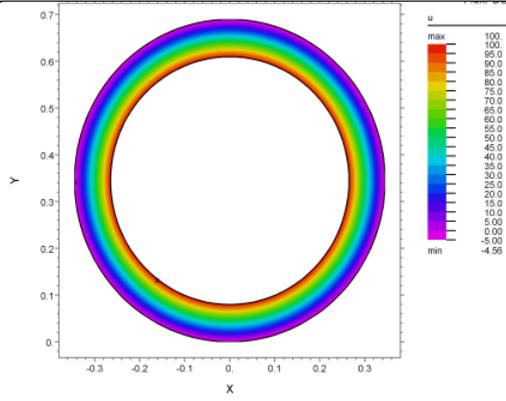


Рис. 1.1. Внутриквартальные трубопроводы СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский»

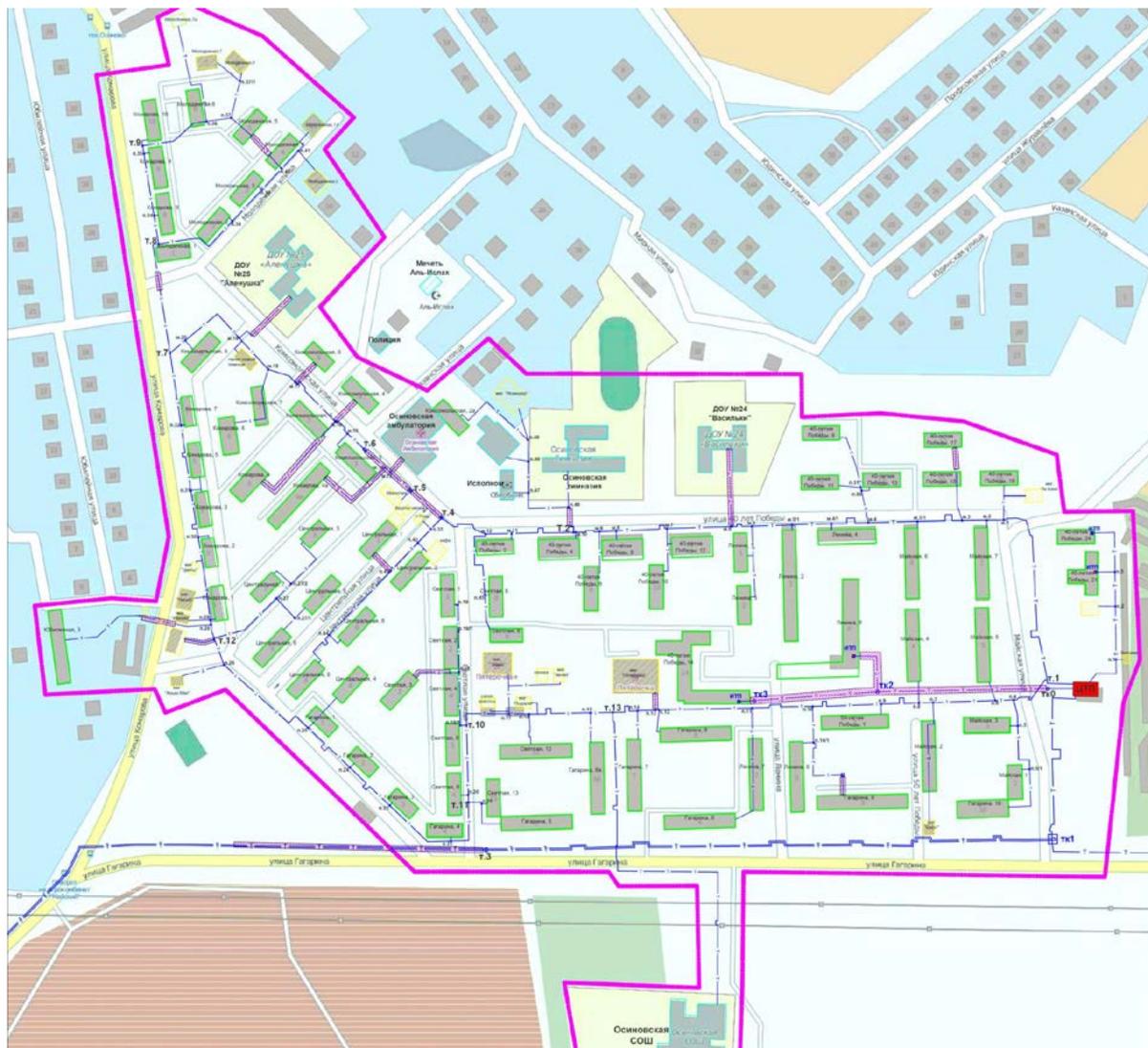


Рис. 1.2. Внутриквартальные трубопроводы СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский», 1 этап реконструкции

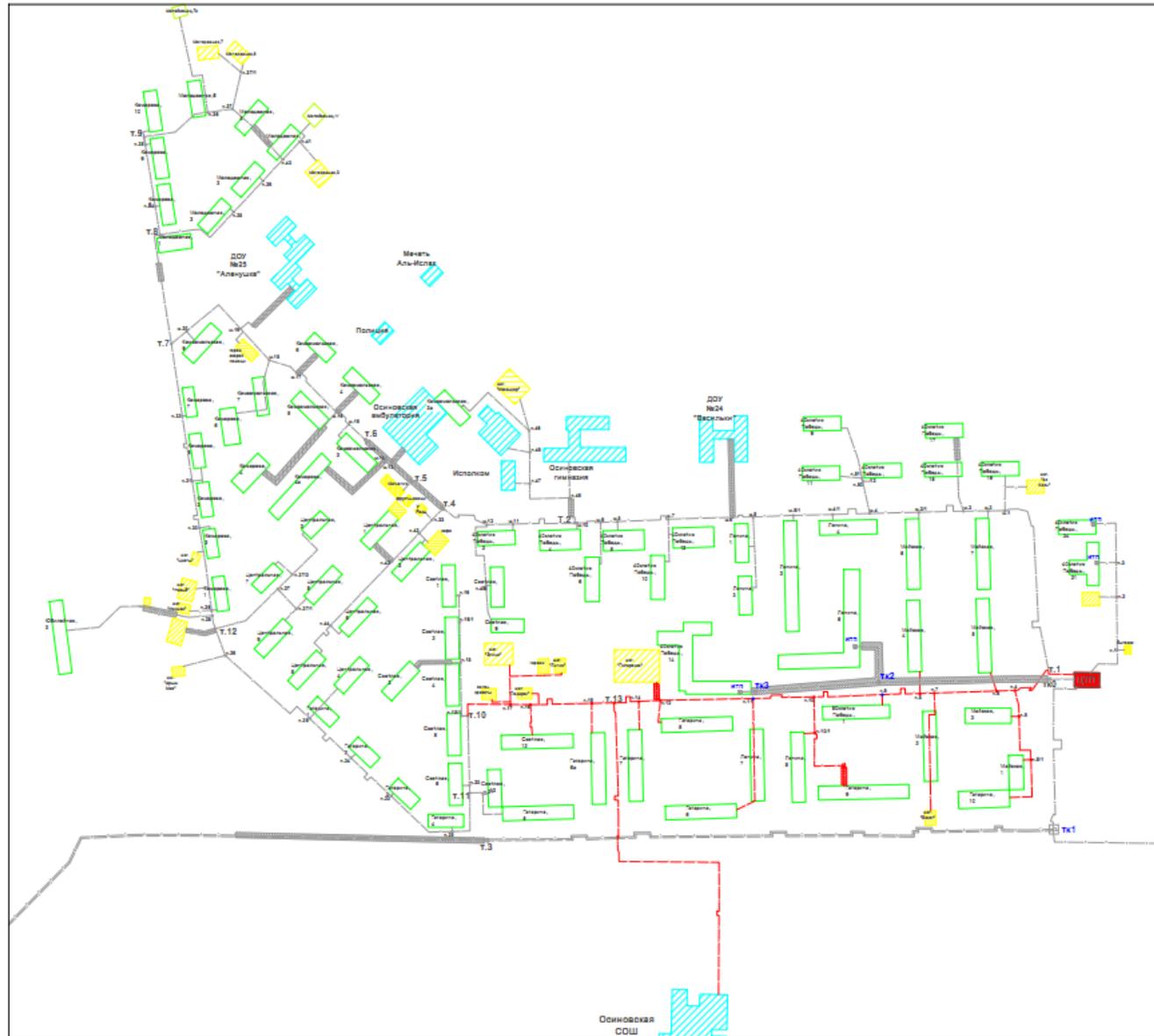


Рис. 1.3. Внутриквартальные трубопроводы СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский», 2 этап реконструкции

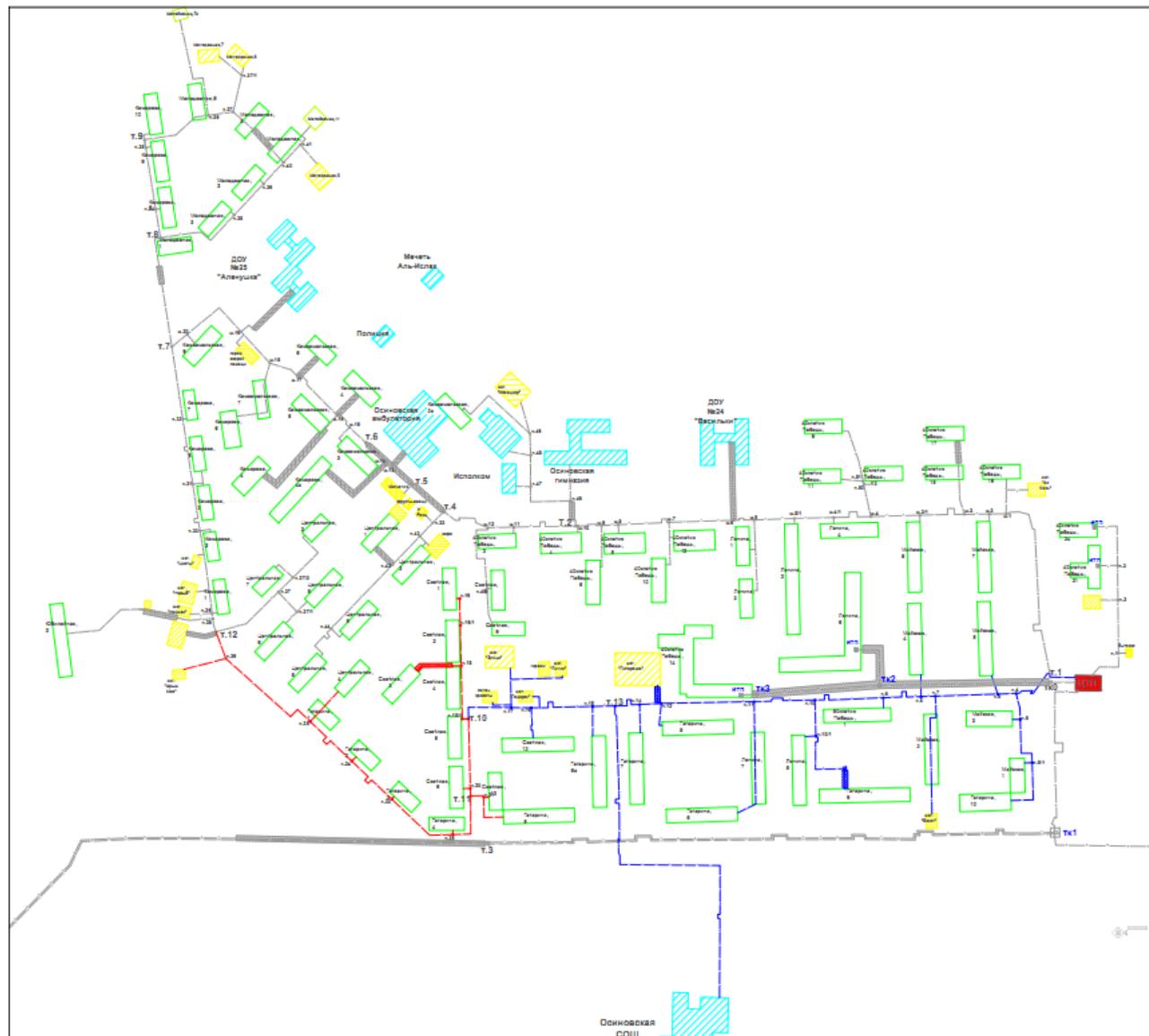








Рис. 1.7. Внутриквартальные трубопроводы СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский», 6 этап реконструкции

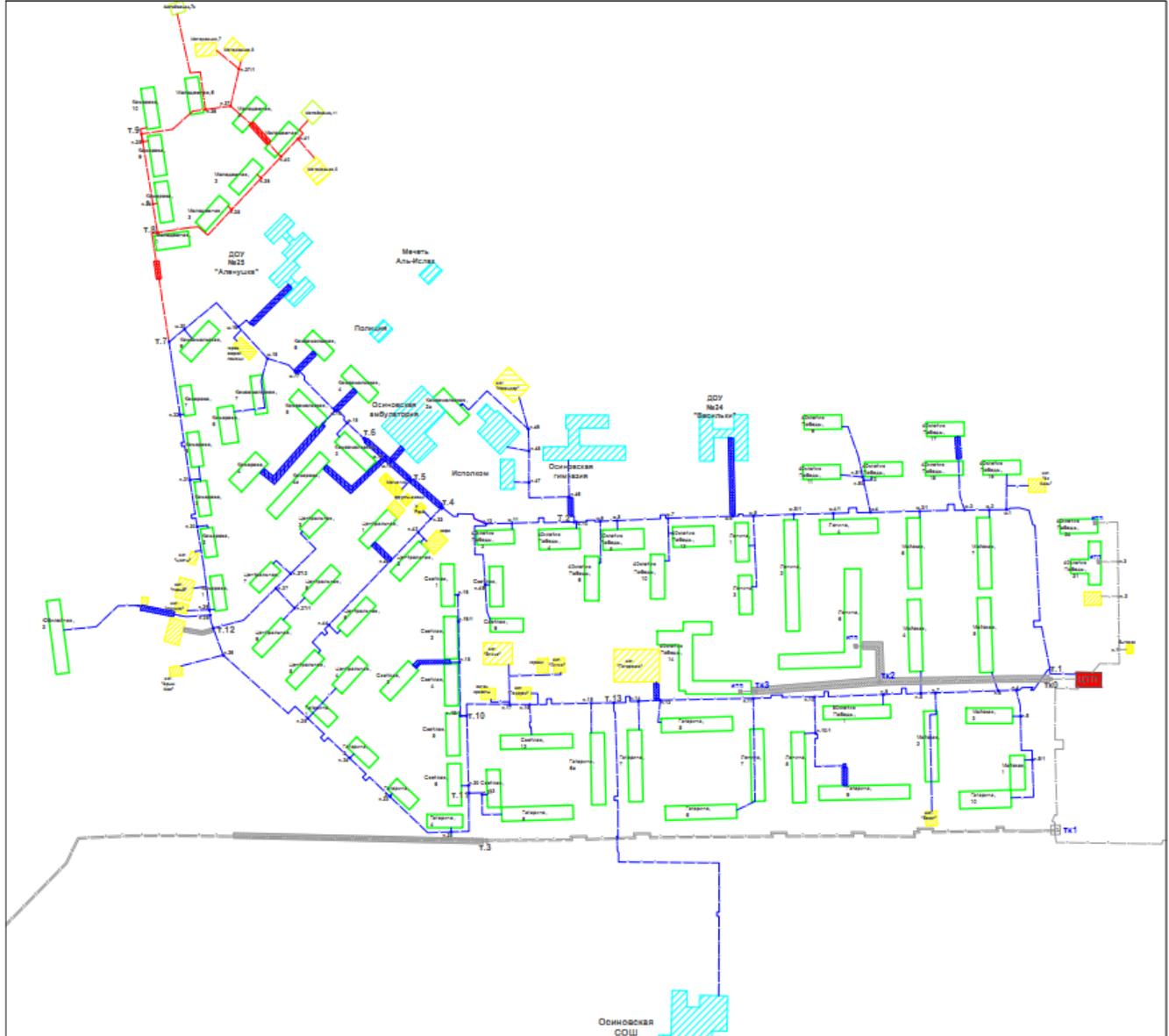




Таблица 5.1. Характеристика СТС поселка Осиново в составе ЭТК «Майский», подлежащих реконструкции

| Наименование участка               | Вид сетей    | Способ прокладки | Отопление   |             | ГВС         |           | Примечания  |               |
|------------------------------------|--------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-------------|---------------|
|                                    |              |                  | Диаметр, мм | Длина, м    | Диаметр, мм |           |             |               |
|                                    |              |                  |             |             | под.        | обр       |             |               |
| <b>поселок Осиново</b>             |              |                  |             |             |             |           |             |               |
| ЦТП - Т.1                          | внутрикварт. | надземная        | 325         | 46,3        | 273         | 219       | 46,3        |               |
| ЦТП - п.1                          | внутрикварт. | надземная        | 89          | 40,9        | -           | -         | -           | реконструкция |
| п.1 - п.2                          | внутрикварт. | надземная        | 89          | 29,5        | -           | -         | -           | реконструкция |
| п.2 - п.3                          | внутрикварт. | надземная        | 89          | 29,5        | -           | -         | -           | реконструкция |
| <i>п.3 - 40 лет Победы, 21, 24</i> | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>20,0</i> | <i>-</i>    | <i>-</i>  | <i>-</i>    | реконструкция |
| Т.1 - м.1                          | внутрикварт. | надземная        | 325         | 191,0       | 273         | 159       | 191,0       | реконструкция |
| <i>м.1. - 40 лет Победы, 19</i>    | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>33,0</i> | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>33,0</i> | реконструкция |
| м.1 - м.2                          | внутрикварт. | надземная        | 325         | 10,0        | 273         | 159       | 10,0        | реконструкция |
| <i>м.2 - Майская, 7</i>            | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>10,0</i> | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>10,0</i> | реконструкция |
| м.2 - м.3                          | внутрикварт. | надземная        | 325         | 23,0        | 273         | 159       | 23,0        | реконструкция |
| <i>м.3 - 40 лет Победы, 15, 17</i> | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>39,5</i> | <i>57</i>   | <i>-</i>  | <i>39,5</i> | реконструкция |
| м.3 - м.3/1                        | внутрикварт. | надземная        | 325         | 54,0        | 219         | 159       | 54,0        | реконструкция |
| м.3/1 - м.4                        | внутрикварт. | надземная        | 325         | 47,0        | 219         | 159       | 47,0        | реконструкция |
| <i>м.3/1 - Майская, 6</i>          | <i>ввод</i>  | <i>подземная</i> | <i>90</i>   | <i>12,0</i> | <i>76</i>   | <i>76</i> | <i>12,0</i> | реконструкция |
| м.4 - п.50                         | внутрикварт. | надземная        | 76          | 44,7        | 57          | 57        | 39,5        | реконструкция |
| п.50 - п.51                        | внутрикварт. | надземная        | 76          | 8,0         | 76          | 76        | 8,0         | реконструкция |
| <i>п.50 - 40 лет Победы, 13</i>    | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>8,0</i>  | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>8,0</i>  | реконструкция |
| <i>п.51 - 40 лет Победы, 11</i>    | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>13,0</i> | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>13,0</i> | реконструкция |
| <i>п.51 - 40 лет Победы, 9</i>     | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>55,0</i> | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>55,0</i> | реконструкция |
| м.4 - м.4/1                        | внутрикварт. | надземная        | 325         | 44,0        | 219         | 159       | 44,0        | реконструкция |
| <i>м.4/1 - Ленина, 4</i>           | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>90</i>   | <i>25,0</i> | <i>76</i>   | <i>57</i> | <i>25,0</i> | реконструкция |
| м.4/1 - м.5/1                      | внутрикварт. | надземная        | 325         | 30,0        | 273         | 159       | 30,0        | реконструкция |

| Наименование участка        | Вид сетей    | Способ прокладки | Отопление   |          | ГВС         |      |          | Примечания    |
|-----------------------------|--------------|------------------|-------------|----------|-------------|------|----------|---------------|
|                             |              |                  | Диаметр, мм | Длина, м | Диаметр, мм |      | Длина, м |               |
|                             |              |                  |             |          | под.        | обр. |          |               |
| м.5/1 - м.5                 | внутрикварт. | надземная        | 325         | 38,0     | 273         | 159  | 38,0     | реконструкция |
| м.5/1 - Ленина, 2           | ввод         | надземная        | 108         | 25,0     | 76          | -    | 25,0     | реконструкция |
| м.5 - Ленина, 1, 3          | ввод         | надземная        | 76          | 80,0     | 76          | 76   | 80,0     | реконструкция |
| м.5 - м.6                   | внутрикварт. | надземная        | 325         | 23,0     | 273         | 159  | 23,0     | реконструкция |
| м.6 - ДОУ №24               | ввод         | канальная        | 76          | 59,5     | 63          | 32   | 59,5     |               |
| м.6 - м.7                   | внутрикварт. | надземная        | 325         | 62,0     | 273         | 159  | 62,0     | реконструкция |
| м.7 - 40 лет Победы, 10, 12 | ввод         | надземная        | 57          | 28,0     | 57          | 57   | 28,0     | реконструкция |
| м.7 - м.8                   | внутрикварт. | надземная        | 325         | 55,0     | 273         | 159  | 55,0     | реконструкция |
| м.8 - 40 лет Победы, 8      | ввод         | надземная        | 57          | 20,0     | 57          | -    | 20,0     | реконструкция |
| м.8 - м.9                   | внутрикварт. | надземная        | 325         | 15,0     | 273         | 159  | 15,0     | реконструкция |
| м.9 - 40 лет Победы, 6      | ввод         | надземная        | 57          | 64,5     | 57          | -    | 64,5     | реконструкция |
| м.9 - м.10                  | внутрикварт. | надземная        | 325         | 25,0     | 273         | 159  | 25,0     | реконструкция |
| м.10 - 40 лет Победы, 4     | ввод         | надземная        | 57          | 12,0     | 57          | -    | 12,0     | реконструкция |
| м.10 - Т.2                  | внутрикварт. | надземная        | 325         | 1,0      | 273         | 159  | 1,0      | реконструкция |
| Т.2 - п.46                  | внутрикварт. | подземная        | 89          | 26,0     | 89          | -    | 26,0     |               |
| п.46 - Осиновская гимназия  | ввод         | надземная        | 76          | 49,5     | 76          | -    | 49,5     | реконструкция |
| п.46 - п.47                 | внутрикварт. | надземная        | 76          | 53,0     | 76          | -    | 53,0     | реконструкция |
| п.47 - п.48                 | внутрикварт. | надземная        | 76          | 30,0     | 76          | -    | 30,0     | реконструкция |
| п.48 - п.49                 | внутрикварт. | надземная        | 57          | 21,0     | 57          | -    | 21,0     | реконструкция |
| п.49 - Комсомольская, 2а    | ввод         | надземная        | 57          | 81,0     | 57          | -    | 81,0     | реконструкция |
| Т.2 - м.11                  | внутрикварт. | надземная        | 325         | 68,0     | 273         | 159  | 68,0     | реконструкция |
| м.11 - м.12                 | внутрикварт. | надземная        | 325         | 25,0     | 273         | 159  | 25,0     | реконструкция |
| м.12 - п.45                 | внутрикварт. | надземная        | 108         | 63,0     | 76          | 76   | 63,0     | реконструкция |
| п.45 - Светлая, 8, 9        | ввод         | надземная        | 108         | 52,0     | 76          | 76   | 52,0     | реконструкция |
| м.12 - Т.4                  | внутрикварт. | надземная        | 219         | 52,0     | 219         | 133  | 52,0     | реконструкция |

| Наименование участка                        | Вид сетей    | Способ прокладки | Отопление   |              | ГВС         |           |              | Примечания    |
|---|--------------|------------------|-------------|--------------|-------------|-----------|--------------|---------------|
|   |              |                  | Диаметр, мм | Длина, м     | Диаметр, мм |           | Длина, м     |               |
|   |              |                  |             |              | под.        | обр.      |              |               |
| Т.4 - п.33                                  | внутрикварт. | надземная        | 108         | 15,0         | 108         | 57        | 15,0         | реконструкция |
| <i>п.33 - маг. «У Розы»</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>57</i>   | <i>26,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i>  | <i>26,0</i>  | реконструкция |
| п.33 - п.42                                 | внутрикварт. | надземная        | 108         | 17,0         | 108         | 108       | 17,0         | реконструкция |
| <i>п.42 - Центральная, 2</i>                | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>90</i>   | <i>13,0</i>  | <i>76</i>   | <i>76</i> | <i>13,0</i>  | реконструкция |
| п.42 - п.43                                 | внутрикварт. | надземная        | 108         | 37,0         | 76          | 76        | 37,0         | реконструкция |
| <i>п.43 - Центральная, 1</i>                | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>57</i>   | <i>23,0</i>  | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>23,0</i>  | реконструкция |
| п.43 - п.44                                 | внутрикварт. | надземная        | 108         | 84,0         | 76          | 76        | 84,0         | реконструкция |
| <i>п.44 - Центральная, 6, 8</i>             | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>61,0</i>  | <i>76</i>   | <i>57</i> | <i>61,0</i>  | реконструкция |
| Т.4 - Т.5                                   | внутрикварт. | канальная        | 219         | 30,0         | 159         | 133       | 30,0         | реконструкция |
| Т.5 - м.13                                  | внутрикварт. | канальная        | 219         | 35,0         | 159         | 133       | 35,0         | реконструкция |
| <i>м.13 - Осиновская амбулатория</i>        | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>90</i>   | <i>23,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i>  | <i>23,0</i>  | реконструкция |
| м.13 - м.14                                 | внутрикварт. | канальная        | 219         | 6,0          | 159         | 133       | 6,0          | реконструкция |
| <i>м.14 - Комарова, 4а</i>                  | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>76</i>   | <i>78,0</i>  | <i>76</i>   | <i>76</i> | <i>78,0</i>  | реконструкция |
| м.14 - Т.6                                  | внутрикварт. | канальная        | 219         | 28,0         | 159         | 133       | 28,0         | реконструкция |
| Т.6 - м.15                                  | внутрикварт. | надземная        | 219         | 22,0         | 159         | 133       | 22,0         | реконструкция |
| <i>м.15 - Комсомольская, 3</i>              | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>57</i>   | <i>18,0</i>  | <i>57</i>   |           | <i>18,0</i>  | реконструкция |
| м.15 - м.16                                 | внутрикварт. | надземная        | 219         | 22,0         | 159         | 133       | 22,0         | реконструкция |
| <i>м.16 - Комсомольская, 5</i>              | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>16,0</i>  | <i>40</i>   | <i>32</i> | <i>16,0</i>  | реконструкция |
| <i>Комсомольская, 5 - Комарова, 4</i>       | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>57</i>   | <i>86,0</i>  | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>86,0</i>  | реконструкция |
| <i>м.16 - Комсомольская, 4</i>              | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>57</i>   | <i>40,0</i>  | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>40,0</i>  | реконструкция |
| м.16 - м.17                                 | внутрикварт. | надземная        | 219         | 60,0         | 159         | 133       | 60,0         | реконструкция |
| <i>м.17 - Комсомольская, 6</i>              | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>57</i>   | <i>35,0</i>  | <i>40</i>   | <i>-</i>  | <i>35,0</i>  | реконструкция |
| м.17 - м.18                                 | внутрикварт. | надземная        | 219         | 30,0         | 159         | 133       | 30,0         | реконструкция |
| <i>м.18 - Комсомольская, 7, Комарова, 6</i> | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>76</i>   | <i>211,0</i> | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>211,0</i> | реконструкция |
| м.18 - м.19                                 | внутрикварт. | надземная        | 159         | 41,0         | 159         | 133       | 41,0         | реконструкция |
| <i>м.19 - ДОУ №25</i>                       | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>76</i>   | <i>59,5</i>  | <i>57</i>   | <i>57</i> | <i>59,5</i>  | реконструкция |

| Наименование участка          | Вид сетей    | Способ прокладки | Отопление   |          | ГВС         |      |          | Примечания    |
|-------------------------------|--------------|------------------|-------------|----------|-------------|------|----------|---------------|
|                               |              |                  | Диаметр, мм | Длина, м | Диаметр, мм |      | Длина, м |               |
|                               |              |                  |             |          | под.        | обр. |          |               |
| м.19 - м.20                   | внутрикварт. | надземная        | 159         | 72,0     | 159         | 133  | 72,0     | реконструкция |
| м.20 - Комсомольская, 9       | ввод         | надземная        | 57          | 11,0     | 57          | 57   | 11,0     | реконструкция |
| м.20 - Т.7                    | внутрикварт. | надземная        | 159         | 19,0     | 159         | 89   | 19,0     | реконструкция |
| Т.7 - Т.8                     | внутрикварт. | надземная        | 159         | 93,0     | 159         | 89   | 93,0     | реконструкция |
| Т.8 - Молодежная, 1           | ввод         | надземная        | 57          | 2,0      | 57          | -    | 2,0      | реконструкция |
| Т.8 - п.34                    | внутрикварт. | надземная        | 159         | 27,0     | 76          | 76   | 27,0     | реконструкция |
| п.34 - Комарова, 8            | ввод         | надземная        | 57          | 4,0      | 57          | -    | 4,0      | реконструкция |
| п.34 - п.35                   | внутрикварт. | надземная        | 159         | 59,0     | 76          | 76   | 59,0     | реконструкция |
| п.35 - Комарова, 9            | ввод         | надземная        | 57          | 4,0      | 57          | -    | 4,0      | реконструкция |
| п.35 - Т.9                    | внутрикварт. | надземная        | 159         | 8,0      | 76          | 76   | 8,0      | реконструкция |
| Т.9 - Комарова, 10            | ввод         | надземная        | 57          | 6,0      | 57          | -    | 6,0      | реконструкция |
| Т.9 - п.36                    | внутрикварт. | надземная        | 76          | 43,0     | 76          | 76   | 43,0     | реконструкция |
| п.36 - Молодежная, 7а         | ввод         | надземная        | 32          | 103,0    | 32          | -    | 103,0    | реконструкция |
| п.36 - п.37                   | внутрикварт. | надземная        | 76          | 21,0     | 76          | -    | 21,0     | реконструкция |
| п.37 - п.37/1                 | ввод         | надземная        | 76          | 53,0     | 76          | -    | 53,0     | реконструкция |
| п.37 - Молодежная, 5          | ввод         | надземная        | 76          | 35,0     | 76          | -    | 35,0     | реконструкция |
| Молодежная, 5 - Молодежная, 4 | ввод         | подземная        | 76          | 36,0     | 76          | -    | 36,0     | реконструкция |
| Т.8 - п.38                    | внутрикварт. | надземная        | 159         | 84,0     | 76          | 76   | 84,0     | реконструкция |
| п.38 - Молодежная, 2          | ввод         | надземная        | 57          | 2,0      | 57          | -    | 2,0      | реконструкция |
| п.38 - п.39                   | внутрикварт. | надземная        | 89          | 41,0     | 76          | 76   | 41,0     | реконструкция |
| п.39 - Молодежная, 3          | ввод         | надземная        | 57          | 2,0      | 57          | -    | 2,0      | реконструкция |
| п.39 - п.40                   | внутрикварт. | надземная        | 89          | 28,0     | 76          | 76   | 28,0     | реконструкция |
| п.40 - Молодежная, 4          | ввод         | надземная        | 57          | 2,0      | 57          | -    | 2,0      | реконструкция |
| п.40 - п.41                   | внутрикварт. | надземная        | 89          | 23,0     | 76          | 76   | 23,0     | реконструкция |
| п.41 - Молодежная, 11         | ввод         | надземная        | 32          | 35,0     | 32          | -    | 35,0     | реконструкция |
| п.41 - Молодежная, 9          | ввод         | надземная        | 57          | 39,5     | -           | -    | -        | реконструкция |

| Наименование участка                      | Вид сетей    | Способ прокладки                | Отопление   |              | ГВС         |          |              | Примечания    |
|---|--------------|---------------------------------|-------------|--------------|-------------|----------|--------------|---------------|
|   |              |                                 | Диаметр, мм | Длина, м     | Диаметр, мм |          | Длина, м     |               |
|   |              |                                 |             |              | под.        | обр.     |              |               |
| Т.7 - п.32                                | внутрикварт. | надземная                       | 159         | 69,0         | 159         | -        | 69,0         | реконструкция |
| <i>п.32 - Комарова, 7</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>3,0</i>   | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>3,0</i>   | реконструкция |
| п.32 - п.31                               | внутрикварт. | надземная                       | 159         | 68,0         | 159         | -        | 68,0         | реконструкция |
| <i>п.31 - Комарова, 3, 5</i>              | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>76</i>   | <i>39,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>39,0</i>  | реконструкция |
| п.31 - п.30                               | внутрикварт. | надземная                       | 159         | 53,0         | 159         | -        | 53,0         | реконструкция |
| <i>п.30 - Комарова, 2</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>20,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>20,0</i>  | реконструкция |
| п.30 - п.29                               | внутрикварт. | надземная                       | 159         | 79,0         | 159         | -        | 79,0         | реконструкция |
| <i>п.29 - Комарова, 1</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>2,0</i>   | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>2,0</i>   | реконструкция |
| п.29 - п.28                               | внутрикварт. | надземная                       | 159         | 5,0          | 159         | -        | 5,0          | реконструкция |
| <i>п.28 - Юбилейная, 3</i>                | <i>ввод</i>  | <i>надземная/<br/>бесканал.</i> | <i>76</i>   | <i>144,0</i> | <i>76</i>   | <i>-</i> | <i>144,0</i> | реконструкция |
| п.28 - Т.12                               | внутрикварт. | надземная                       | 219         | 13,0         | 159         | -        | 13,0         | реконструкция |
| Т.12 - п.27                               | внутрикварт. | надземная                       | 108         | 80,0         | 76          | -        | 80,0         | реконструкция |
| п.27 - п.27/1                             | внутрикварт. | надземная                       | 76          | 26,0         | 76          | -        | 26,0         | реконструкция |
| <i>п.27/1 - Центральная, 5, 9</i>         | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>76</i>   | <i>55,0</i>  | <i>76</i>   | <i>-</i> | <i>55,0</i>  | реконструкция |
| п.27 - п.27/2                             | внутрикварт. | надземная                       | 76          | 20,0         | 76          | -        | 20,0         | реконструкция |
| <i>п.27/2 - Центральная, 7</i>            | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>23,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>23,0</i>  | реконструкция |
| <i>п.27/2 - Центральная, 3</i>            | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>54,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>54,0</i>  | реконструкция |
| Т.12 - п.26                               | внутрикварт. | надземная                       | 219         | 37,0         | 159         | -        | 37,0         | реконструкция |
| п.26 - п.25                               | внутрикварт. | надземная                       | 219         | 109,0        | 159         | -        | 109,0        | реконструкция |
| <i>п.25 - Гагарина, 1, Центральная, 4</i> | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>28,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>28,0</i>  | реконструкция |
| п.25 - п.24                               | внутрикварт. | надземная                       | 219         | 58,0         | 159         | -        | 58,0         | реконструкция |
| <i>п.24 - Гагарина, 2</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>15,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>15,0</i>  | реконструкция |
| п.24 - п.23                               | внутрикварт. | надземная                       | 219         | 77,0         | 159         | -        | 77,0         | реконструкция |
| <i>п.23 - Гагарина, 3</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i>                | <i>57</i>   | <i>20,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>20,0</i>  | реконструкция |
| п.23 - п.22                               | внутрикварт. | надземная                       | 219         | 72,0         | 159         | -        | 72,0         | реконструкция |

| Наименование участка                   | Вид сетей    | Способ прокладки | Отопление   |             | ГВС         |          |             | Примечания    |
|--|--------------|------------------|-------------|-------------|-------------|----------|-------------|---------------|
|  |              |                  | Диаметр, мм | Длина, м    | Диаметр, мм |          | Длина, м    |               |
|  |              |                  |             |             | под.        | обр      |             |               |
| <i>п.22 - Гагарина, 4</i>              | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>10,0</i> | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>10,0</i> | реконструкция |
| п.22 - Т.11                            | внутрикварт. | надземная        | 219         | 57,0        | 159         | -        | 57,0        | реконструкция |
| Т.11 - п.21                            | внутрикварт. | надземная        | 108         | 16,0        | 108         | -        | 16,0        | реконструкция |
| <i>п.21 - Светлая, 13, Гагарина, 5</i> | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>108</i>  | <i>26,0</i> | <i>76</i>   | <i>-</i> | <i>26,0</i> | реконструкция |
| Т.11 - п.20                            | внутрикварт. | надземная        | 273         | 7,0         | 159         | -        | 7,0         | реконструкция |
| <i>п.20 - Светлая, 6</i>               | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>7,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>7,0</i>  | реконструкция |
| п.20 - Т.10                            | внутрикварт. | надземная        | 273         | 66,0        | 159         | -        | 66,0        | реконструкция |
| Т.10 - п.18/1                          | внутрикварт. | надземная        | 108         | 2,0         | 76          | -        | 2,0         | реконструкция |
| <i>п.18/1 - Светлая, 5</i>             | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>4,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>4,0</i>  | реконструкция |
| п.18/1 - п.18                          | внутрикварт. | надземная        | 108         | 51,0        | 108         | 76       | 51,0        | реконструкция |
| <i>п.18 - Светлая, 3, 4</i>            | <i>ввод</i>  | <i>канальная</i> | <i>57</i>   | <i>32,0</i> | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>32,0</i> | реконструкция |
| п.18 - п.19/1                          | внутрикварт. | надземная        | 108         | 64,5        | 108         | 76       | 64,5        | реконструкция |
| <i>п.19/1 - Светлая, 2</i>             | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>2,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>2,0</i>  | реконструкция |
| п.19/1 - п.19                          | внутрикварт. | надземная        | 108         | 49,0        | 108         | -        | 49,0        | реконструкция |
| <i>п.19 - Светлая, 1</i>               | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>57</i>   | <i>2,0</i>  | <i>57</i>   | <i>-</i> | <i>2,0</i>  | реконструкция |
| Т.10 - п.17                            | внутрикварт. | надземная        | 325         | 55,0        | 159         | -        | 55,0        | реконструкция |
| п.17 - п.16                            | внутрикварт. | надземная        | 325         | 19,0        | 159         | -        | 19,0        | реконструкция |
| <i>п.16 - Светлая, 12</i>              | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>31,0</i> | <i>76</i>   | <i>-</i> | <i>31,0</i> | реконструкция |
| п.16 - п.15                            | внутрикварт. | надземная        | 325         | 69,0        | 159         | -        | 69,0        | реконструкция |
| <i>п.15 - Гагарина, ба</i>             | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>24,5</i> | <i>76</i>   | <i>-</i> | <i>24,5</i> | реконструкция |
| п.15 - Т.13                            | внутрикварт. | надземная        | 325         | 21,0        | 159         | -        | 21,0        | реконструкция |
| Т.13 - Осиновская СОШ                  | внутрикварт. | надземная        | 108         | 325,0       | 57          | -        | 325,0       |               |
| Т.13 - п.14                            | внутрикварт. | надземная        | 325         | 34,0        | 159         | -        | 34,0        | реконструкция |
| <i>п.14 - Гагарина, 7</i>              | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | <i>76</i>   | <i>29,5</i> | <i>76</i>   | <i>-</i> | <i>29,5</i> | реконструкция |
| п.14 - п.13                            | внутрикварт. | надземная        | 325         | 8,0         | 159         | -        | 8,0         | реконструкция |
| п.13 - п.12                            | внутрикварт. | надземная        | 325         | 16,0        | 159         | -        | 16,0        | реконструкция |

| Наименование участка                    | Вид сетей    | Способ прокладки | Отопление   |          | ГВС         |     |          | Примечания    |
|---|--------------|------------------|-------------|----------|-------------|-----|----------|---------------|
|   |              |                  | Диаметр, мм | Длина, м | Диаметр, мм |     | Длина, м |               |
|   |              |                  |             |          | под.        | обр |          |               |
| <i>п.12 - Гагарина, 8</i>               | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 76          | 17,0     | 76          | -   | 17,0     | реконструкция |
| п.12 - п.11                             | внутрикварт. | надземная        | 325         | 86,0     | 159         | -   | 86,0     | реконструкция |
| <i>п.11 - Ленина, 7</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 76          | 35,5     | 76          | -   | 35,5     | реконструкция |
| <i>Ленина, 7 - Гагарина, 6</i>          | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 57          | 30,0     | 57          | -   | 30,0     | реконструкция |
| п.11 - п.10                             | внутрикварт. | надземная        | 325         | 63,0     | 159         | -   | 63,0     | реконструкция |
| п.10 - п.10/1                           | внутрикварт. | надземная        | 108         | 35,0     | 76          | -   | 35,0     | реконструкция |
| <i>п.10/1 - Ленина, 8</i>               | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 76          | 10,0     | 76          | -   | 10,0     | реконструкция |
| <i>п.10/1 - Гагарина, 9</i>             | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 108         | 71,6     | 108         | -   | 71,6     | реконструкция |
| п.10 - п.9                              | внутрикварт. | надземная        | 325         | 75,0     | 219         | -   | 75,0     | реконструкция |
| <i>п.9 - 50 лет Победы, 1</i>           | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 76          | 10,0     | 57          | -   | 10,0     | реконструкция |
| п.9 - п.8                               | внутрикварт. | надземная        | 325         | 46,0     | 219         | 133 | 46,0     | реконструкция |
| <i>п.8 - Майская, 4</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 76          | 21,0     | 76          | -   | 21,0     | реконструкция |
| п.8 - п.7                               | внутрикварт. | надземная        | 325         | 14,0     | 219         | 133 | 14,0     | реконструкция |
| <i>п.7 - Майская, 2</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>подземная</i> | 76          | 17,0     | 76          | -   | 17,0     | реконструкция |
| п.7 - п.6                               | внутрикварт. | надземная        | 325         | 60,0     | 219         | 133 | 60,0     | реконструкция |
| <i>п.6 - Майская, 5</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 76          | 18,0     | 57          | -   | 18,0     | реконструкция |
| п.6 - п.4                               | внутрикварт. | надземная        | 325         | 17,0     | 219         | 133 | 17,0     | реконструкция |
| п.4 - п.5                               | внутрикварт. | надземная        | 76          | 34,5     | 57          | 57  | 34,5     | реконструкция |
| <i>п.5 - Майская, 3</i>                 | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 57          | 34,5     | 57          | -   | 34,5     | реконструкция |
| п.5 - п.5/1                             | внутрикварт. | надземная        | 76          | 51,0     | 57          | 57  | 51,0     | реконструкция |
| <i>п.5/1 - Майская, 1, Гагарина, 10</i> | <i>ввод</i>  | <i>надземная</i> | 76          | 190,0    | 76          | -   | 190,0    | реконструкция |
| п.4 - Т.1                               | внутрикварт. | надземная        | 325         | 48,0     | 219         | 133 | 48,0     | реконструкция |
| ТК0 - ТК2                               | внутрикварт. | бесканал.        | 219         | 163,0    | -           | -   | -        |               |
| <i>ТК2 - Ленина, 6</i>                  | <i>ввод</i>  | <i>бесканал.</i> | 159         | 55,0     | -           | -   | -        |               |
| ТК2 - ТК3                               | внутрикварт. | бесканал.        | 219         | 118,0    | -           | -   | -        |               |

| Наименование участка                 | Вид сетей   | Способ прокладки | Отопление   |               | ГВС         |      | Примечания    |          |
|--------------------------------------|-------------|------------------|-------------|---------------|-------------|------|---------------|----------|
|                                      |             |                  | Диаметр, мм | Длина, м      | Диаметр, мм |      |               | Длина, м |
|                                      |             |                  |             |               | под.        | обр. |               |          |
| <i>ТКЗ - 40 лет Победы, 14</i>       | <i>ввод</i> | <i>бесканал.</i> | <i>159</i>  | <i>15,0</i>   | -           | -    | -             |          |
| <b>ИТОГО внутриквартальные сети:</b> |             |                  |             | <b>4535,9</b> |             |      | <b>4149,8</b> |          |
| <b>ВСЕГО:</b>                        |             |                  |             | <b>7342,5</b> |             |      | <b>6826,9</b> |          |



КГУ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
 высшего образования  
 «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
 (ФГБОУ ВО «КГУ»)

УТВЕРЖДАЮ  
 Проректор по АХР  
 А.Д. Зиганшин  
 «15» января 2019 г.



А К Т  
 об использовании результатов  
 диссертационной работы  
 Закировой Ильмиры Асхатовны

Комиссия в составе:

председатель Хакимуллин А.Р. – начальник отдела главного энергетика и механика;  
 члены комиссии Хакимуллина Л.Г. – инженер отдела главного энергетика и механика; Амирханов Ф.Н. – мастер по отоплению, вентиляции и водоснабжению, канализации отдела главного энергетика и механика,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы Закировой Ильмиры Асхатовны, представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук использованы при проведении ремонтно-восстановительных работ по улучшению тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения, расположенных в тепловом узле ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» для улучшения теплозащитных свойств существующей тепловой изоляции трубопроводов.

Внедрение технологии по результатам работы Закировой И.А. позволило повысить на 15% теплозащитные свойства тепловой изоляции и получить экономию тепловой энергии за отопительный период 2017-2018г. в объеме 12560 Гкал.

Председатель комиссии:

Хакимуллин А.Р.

Члены комиссии:

Хакимуллина Л.Г.

Амирханов Ф.Н.

МП

## СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационного исследования И.А. Закировой «Повышение эффективности энерготехнологических комплексов и систем теплоснабжения тонкопленочным покрытием тепловой изоляции трубопроводов», представленного на соискание ученой степени кандидата технических наук в Диссертационный совет Д 212.082.06 по специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Результаты диссертационной работы Закировой Ильмиры Асхатовны «Повышение эффективности энерготехнологических комплексов и систем теплоснабжения тонкопленочным покрытием тепловой изоляции трубопроводов» внедрены в практику деятельности нашего предприятия.

В частности:

1. Предложенный в работе способ усовершенствования технологической схемы источника энергоснабжения энерготехнологического комплекса «Майский», с целью снижения вредного воздействия уходящих дымовых газов.

2. Предложенный способ энергосбережения и повышения энергоэффективности существующей тепловой изоляции трубопроводов системы теплоснабжения входящих в состав энерготехнологического комплекса «Майский» за счет применения тонкопленочного покрытия.

Главный инженер  
АО «Энергоцентр Майский»



Молодых Р.А.