Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Наливайко Антон Юрьевич
Должность: проректор по научной работе
Дата подписания: 01.11.2023 17:25:13
Уникальный программный ключ:
1a3df673e07fcd54440aceed8bb7e29f4817bf0a

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

УТВЕРЖДЕНО
Декан Факультета урбанистики и
городского хозяйства
Марюшин Л.А.
«30» августа 2020г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ

«Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя»

Направление подготовки
13.06.01 Электро- и теплотехника

Профиль подготовки
Промышленная теплоэнергетика

Программа аспирантуры

Форма обучения
Очная

Москва 2020

1. Цели освоения дисциплины

К **основным целям** освоения дисциплины «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» следует отнести изучение фундаментальных основ процессов тепло- и массообмена и гидродинамики при фазовых и химических превращениях веществ и материалов..

К **основным задачам** освоения дисциплины «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» следует отнести:

– изучение законов тепло- и массопереноса и гидродинамики при фазовых и химических превращениях;

– изучение основных видов процессов и конструкций аппаратов, принципов построения установок и систем для превращений и обработки веществ и материалов, сопровождающихся фазовыми и химическими превращениями;

– изучение основ технологии производства и обработки веществ и материалов при фазовых и химических превращениях;

– научить методам разработки и создания новых энергосберегающих и экологичных аппаратов, установок и систем для реализации процессов, сопровождающихся фазовыми и химическими превращениями;

– научить выполнять расчеты и аппаратов, установок и систем для реализации процессов, сопровождающихся фазовыми и химическими превращениями.

2. Место дисциплины в структуре ООП аспирантуры

Дисциплина «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» относится к числу учебных дисциплин Блока 1 вариативной части основной образовательной программы аспирантуры (Б1.В.ОД.1).

«Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» взаимосвязана логически и содержательно-методически со следующими дисциплинами ООП:

В вариативной части (Б1.В):

– Методы интенсификации теплообмена в энергетических установках.

В блоке дисциплин по выбору (Б1.В.ДВ):

– Методология теплотехнического эксперимента;

– Моделирование процессов и аппаратов промышленной теплоэнергетики.

3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с планируемыми результатами освоения образовательной программы

В результате освоения дисциплины (модуля) у обучающихся формируются следующие компетенции и должны быть достигнуты следующие результаты обучения как этап формирования соответствующих компетенций:

Код компетенции	В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать	Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине
ОПК-1	владением методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности	**знать:** • основные методы теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности **уметь:** • проводить теоретические и экспериментальные исследования в области профессиональной деятельности **владеть:** • методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности
ПК-2	способность выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	**знать:** • методы выполнения научных исследований в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля **уметь:** • выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля **владеть:** • способностью выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля

4. Структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» составляет **3** зачетных единицы, т.е. **108** академических часа (из них 8 часов – лекции, 16 часов – семинарские занятия, 84 час – самостоятельная работа аспирантов).

Структура и содержание дисциплины «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» по срокам и видам работы отражены в Приложении 1.

Содержание разделов дисциплины

Четвертый семестр

Тема 1. Введение.

Примеры физических задач, требующих применения методов расчета, физического, математического и компьютерного моделирования, экспериментального исследования процессов тепло- и масообмена в аппаратах,

установках и системах промышленной теплоэнергетики и технологии при фазовых и химических превращениях обрабатываемых веществ, материалов и теплоносителей. Достижения в этой области науки и техники за последние двадцать лет. Нерешенные проблемы.

Тема 2. Теплообмен при конденсации однокомпонентного пара

Условия возникновения конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Коэффициент конденсации. Термическое сопротивление фазового перехода.

Теоретический расчет теплообмена при конденсации практически неподвижного пара (ламинарное и турбулентное течение конденсата); сравнение с опытными данными и расчетные рекомендации. Влияние на теплоотдачу скорости пара. Конденсация пара внутри труб. Конденсация пара на горизонтальных трубах и пучках труб.

Теплоотдача при капельной конденсации пара. Основные представления о механизме процесса, расчетные уравнения. Влияние перегрева, и влажности пара на коэффициент теплоотдачи. Особенности теплоотдачи при конденсации паров металлов.

Тема 3. Теплообмен при кипении однокомпонентной жидкости

Условия возникновения кипения. Перегрев жидкости и наличие центров парообразования как условия возникновения паровой фазы. Рост, отрыв и движение пузырей пара. Теплообмен при пузырьковом кипении между стенкой и жидкой фазой, между жидкой и паровой фазами. Механизм кипения жидкостей. Влияние свойств поверхности и давления системы. Рост паровых пузырей в области высоких и низких давлений. Особенности кипения жидких металлов и криогенных жидкостей. 1-й кризис теплоотдачи. Негидродинамические аспекты кризиса. Предельные оценки по $q_{пр}$ в каналах. При-рода 2-го кризиса кипения. Теплоотдача при пленочном кипении.

Анализ специальных условий совместности для переноса через границу в однокомпонентных системах. Оценка влияния неравновесных эффектов. Квазиравновесная схема. Зависимость коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока от температурного напора, давления, физических свойств жидкости, состояния поверхности и других факторов три кипении в большом объеме для пузырькового кипения. Пленочный режим. Первая и вторая критические плотности теплового потока. «Кризисы» второго рода.

Структура и режимы течения при кипений внутри труб. Массовое и объемное расходные паросодержания. Скорость циркуляции. Развитие процесса по длине трубы.

Метод обобщения опытных данных по теплообмену при пузырьковом кипении в большом объеме и в трубах. Обобщенные и частные эмпирические зависимости для коэффициентов теплоотдачи.

Теплообмен при турбулентном режиме пленочного кипения жидкости. Зависимость первой и второй критических плотностей теплового потока от различных факторов. Особенности теплообмена при кипении жидких метал-лов.

Тема 4. Тепло- и массообмен в двухкомпонентных средах

Основные положения тепло- и массообмена в бинарных парогазовых смесях. Законы молекулярного переноса массы. Конвективный массообмен. Молекулярная и молярная диффузия и их связь с другими физическими процессами переноса. Концентрационная диффузия. Закон Фика. Коэффициенты молекулярной диффузии. Термо- и бародиффузия. Термодиффузионное отношение и коэффициент термодиффузии. Термо- и бародиффузия. Конвективный массообмен. Массоотдача. Коэффициенты массоотдачи. Стефанов поток при полупроницаемой поверхности раздела фаз.

Дифференциальные уравнения совместного тепло- и массообмена в бинарных парогазовых смесях. Краевые условия. Стефанов поток. Аналогия процессов тепло- и массообмена в парогазовых смесях. Тройная аналогия. Условия выполнения аналогии и ее практическое использование.

Диффузионный пограничный слой, результаты его расчета. Расчет коэффициентов тепло- и массоотдачи при испарении со свободной поверхности и из пористого тела. Особенности испарения из капилляров. Тепло- и массообмен при испарении жидкости в парогазовую среду. Уравнения баланса теплоты и массы. Диффузионный пограничный слой. Тепло- и массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси. Влияние проницаемости межфазной поверхности на процессы совместного тепло- и массопереноса. Процессы адиабатического и неадиабатического испарения. Методы определения коэффициентов тепло- и массоотдачи.

Тепло- и массоотдача при конденсации смеси паров и пара из парогазовой смеси. Изменение концентраций и температур в парогазовой смеси. Распределение переносимого тепла по отдельным составляющим. Зависимость интенсивности теплообмена от содержания неконденсирующегося компонента при различных условиях протекания процесса.

Тема 5. Основы тепло- и массообмена при химических превращениях

Основные понятия. Краткие сведения из термохимии и химической кинетики. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена при химических превращениях. Краевые условия. Замороженное и равновесное течение реагирующих сред. Преобразованный закон Ньютона – Рихмана. Теплообмен между смесью реагирующих веществ и поверхностью раздела фаз.

Тема 6. Тепло- и массообмен при химических превращениях

Энтальпия газа и смеси газов с учетом энергии образования. Краевые задачи для совместных процессов тепло- и маосообмена при наличии химических реакций; частные случаи, их аналогии с ранее изученными процессами.

Особенности тепло- и маосообмена в диссоциированном и ионизирован-ном газах. Модификация закона Ньютона—Рихмана. Равновесные и неравновесные процессы.

5. Образовательные технологии

Методика преподавания дисциплины «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» и реализация

компетентностного подхода в изложении и восприятии материала предусматривает использование следующих активных и интерактивных форм проведения групповых, индивидуальных, аудиторных занятий в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся:

– подготовка к выполнению практических работ в аудиториях вуза и на мощностях предприятий-партнеров;

– подготовка, представление и обсуждение презентаций на занятиях;

– организация и проведение текущего контроля знаний аспирантов в форме бланкового тестирования;

– использование интерактивных форм текущего контроля в форме аудиторного и внеаудиторного интернет-тестирования;

– проведение мастер-классов экспертов и специалистов по методам современного проектирования и 3D-моделирования теплоэнергетических установок, а также эффективных методов эксплуатации промышленных теплоэнергетических установок.

6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов

В процессе обучения используются следующие оценочные формы самостоятельной работы аспирантов, оценочные средства текущего контроля успеваемости и промежуточных аттестаций:

- подготовка и выступление с презентацией и обсуждением на тему «Процессы с фазовыми преобразованиями теплоносителя» (индивидуально для каждого обучающегося);
- решение ситуационных задач, анализ принятых проектных решений;
- тестирование.

Оценочные средства текущего контроля успеваемости включают контрольные вопросы и задания в форме бланкового и (или) компьютерного тестирования, для контроля освоения обучающимися разделов дисциплины.

Образцы тестовых заданий, контрольных вопросов и заданий для проведения текущего контроля, приведены в приложении 2.

6.1. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине (модулю)

6.1.1. Перечень компетенций с указанием этапов их формирования в процессе освоения образовательной программы. В результате освоения дисциплины (модуля) формируются следующие компетенции

Код компетенции	В результате освоения образовательной программы обучающийся должен обладать
ОПК-1	владением методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности
ПК-2	способность выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля

В процессе освоения образовательной программы данные компетенции, в том числе их отдельные компоненты, формируются поэтапно в ходе освоения обучающимися дисциплин (модулей), практик в соответствии с учебным планом и календарным графиком учебного процесса.

6.1.2. Описание показателей и критериев оценивания компетенций, формируемых по итогам освоения дисциплины (модуля), описание шкал оценивания

Показателем оценивания компетенций на различных этапах их формирования является достижение обучающимися планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю).

ОПК-1 - владением методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности				
Показатель	**Критерии оценивания**			
	Оценка «неудовлетворительно» или отсутствие сформированности компетенции	**Оценка «удовлетворительно» или низкой уровень освоения компетенции**	**Оценка «хорошо» или повышенный уровень освоения компетенции**	**Оценка «отлично» или высокий уровень освоения компетенции**
знать: основные методы теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: основные методы теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: основные методы теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний,	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: основные методы теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности, но допускаются	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: основные методы теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности, свободно оперирует

		по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации.	незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.	приобре-тенными знаниями.
уметь: проводить теоретические и экспериментальные исследования в области профессиональной деятельности	Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет проводить теоретические и экспериментальные исследования в области профессиональной деятельности	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: проводить теоретические и экспериментальные исследования в области профессиональной деятельности. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: проводить теоретические и экспериментальные исследования в области профессиональной деятельности. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: проводить теоретические и экспериментальные исследования в области профессиональной деятельности. Свободно оперирует приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.
владеть: методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности	Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности	Обучающийся владеет методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности в неполном объеме, допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность владения навыками по ряду показателей, Обучающийся испытывает значительные затруднения при применении навыков в новых ситуациях.	Обучающийся частично владеет методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности, навыки освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	Обучающийся в полном объеме владеет методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.
ПК-2 - способность выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля				

знать: методы выполнения научных исследований в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	Обучающийся демонстрирует полное отсутствие или недостаточное соответствие следующих знаний: методы выполнения научных исследований в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих знаний: методы выполнения научных исследований в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность знаний, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями при их переносе на новые ситуации.	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих знаний: методы выполнения научных исследований в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях.	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих знаний: методы выполнения научных исследований в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля, свободно оперирует приобретенными знаниями.
уметь: выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	Обучающийся не умеет или в недостаточной степени умеет выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	Обучающийся демонстрирует неполное соответствие следующих умений: выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля. Допускаются значительные ошибки, проявляется недостаточность умений, по ряду показателей, обучающийся испытывает значительные затруднения при оперировании умениями при их переносе на новые ситуации.	Обучающийся демонстрирует частичное соответствие следующих умений: выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля. Умения освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	Обучающийся демонстрирует полное соответствие следующих умений: выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля. Свободно оперирует приобретенными умениями, применяет их в ситуациях повышенной сложности.
владеть: способностью выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	Обучающийся не владеет или в недостаточной степени владеет способностью выполнять научные исследования в научно-исследовательс	Обучающийся владеет способностью выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля в неполном объеме, допускаются значительные ошибки,	Обучающийся частично владеет способностью выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля, навыки	Обучающийся в полном объеме владеет способностью выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования

	ких организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	проявляется недостаточность владения навыками по ряду показателей, Обучающийся испытывает значительные затруднения при применении навыков в новых ситуациях.	освоены, но допускаются незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе умений на новые, нестандартные ситуации.	теплоэнергетического профиля, свободно применяет полученные навыки в ситуациях повышенной сложности.

Шкалы оценивания результатов промежуточной аттестации и их описание:

Форма промежуточной аттестации: экзамен.

Промежуточная аттестация обучающихся в форме экзамена проводится по результатам выполнения всех видов учебной работы, предусмотренных учебным планом по данной дисциплине (модулю), при этом учитываются результаты текущего контроля успеваемости в течение семестра. Оценка степени достижения обучающимися планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю) проводится преподавателем, ведущим занятия по дисциплине (модулю) методом экспертной оценки. По итогам промежуточной аттестации по дисциплине (модулю) выставляется оценка «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» или «неудовлетворительно».,

К промежуточной аттестации допускаются только аспиранты, выполнившие все виды учебной работы, предусмотренные рабочей программой по дисциплине «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» (прошли промежуточный контроль, выполнили весь объем работ, выступили с докладом на семинарском занятии)

Шкала оценивания	**Описание**
Отлично	Выполнены все виды учебной работы, предусмотренные учебным планом. Аспирант демонстрирует соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателей, оперирует приобретенными знаниями, умениями, навыками, применяет их в ситуациях повышенной сложности. При этом могут быть допущены незначительные ошибки, неточности, затруднения при аналитических операциях, переносе знаний и умений на новые, нестандартные ситуации.
Хорошо	Аспирант показывает достаточный уровень теоретических и практических знаний, свободно оперирует категориальным аппаратом. Умеет анализировать практические ситуации, но допускает некоторые погрешности. Ответ построен логично, материал излагается грамотно.
Удовлетворительно	Аспирант показывает знание основного учебного материала. В ответе не всегда присутствует логика изложения. Аспирант испытывает затруднения при приведении практических примеров.

Неудовлетворительно	Не выполнен один или более видов учебной работы, предусмотренных учебным планом. Аспирант демонстрирует неполное соответствие знаний, умений, навыков приведенным в таблицах показателей, допускаются значительные ошибки, проявляется отсутствие знаний, умений, навыков по ряду показателей, аспирант испытывает значительные затруднения при оперировании знаниями и умениями при их переносе на новые ситуации.

Фонды оценочных средств представлены в приложениях к рабочей программе.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Общая энергетика: учебное пособие / В.В. Шапошников, Е.В. Кочарян, Н.Г. Андрейко [и др.]. — Краснодар: КубГТУ, 2020. — 287 с. — ISBN 978-5-8333-0955-1. — Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/167042.

2. Поникаров, А. С. Многокомпонентный массоперенос в системах газ (пар) – жидкость: монография / А.С. Поникаров, Э. Ш. Теляков. — Казань: КНИТУ, 2019. — 128 с. — ISBN 978-5-7882-2575-3. — Текст : электронный // Лань: электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/166180.

3. Моисеев Б.В. Промышленная теплоэнергетика [Электронный ресурс]: учеб. / Б.В. Моисеев, Ю.Д. Земенков, С.Ю. Торопов. — Электрон. дан. — Тюмень: ТюмГНГУ, 2014. — 236 с.

4. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочная серия: В 4 кн. Кн. 4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник [Электронный ресурс]: справ. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2007. — 632 с.

5. Лабунцов Д.А., Механика двухфазных систем [Электронный ресурс]: учеб. пособие / Лабунцов Д.А., Ягов В.В. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2016. — 384 с.

б) дополнительная литература:

1. Макеева, Е.Н. Интенсивные теплообменные поверхности для испарителей холодильных и теплонасосных установок на смесевых озонобезопасных гидрофторуглеродах / Е. Н. Макеева, О. А. Кныш // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П.О. Сухого. — 2019. — № 3. — С. 71-76. — ISSN 1819-5245. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/journal/issue/313252.

2. Семенов Б.А. Инженерный эксперимент в промышленной теплотехнике, теплоэнергетике и теплотехнологиях [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2013. — 384 с.

3. Ягов В.В. Теплообмен в однофазных средах и при фазовых превращениях: учебное пособие для вузов [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2014. — 542 с.

4. Григорьев Б.А., Тепломассообмен: учебник для вузов [Электронный ресурс]: учеб. / Григорьев Б.А., Цветков Ф.Ф.. — Электрон. дан. — Москва: Издательский дом МЭИ, 2011. — 562 с.

5. Теплообмен в ядерных энергетических установках: сборник задач: учебное пособие для вузов [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.В. Архипов [и др.]. — Электрон. дан. — Москва: НИЯУ МИФИ, 2010. — 128 с.

6. Архипов В.А. Физико-химические основы процессов тепломассообмена: учебное пособие [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Томск: ТПУ, 2015. — 199 с.

7. Ивлиев А.Д. Физика [Электронный ресурс]: учеб. пособие — Электрон. дан. — Санкт-Петербург: Лань, 2009. — 672 с.

в) программное обеспечение и интернет-ресурсы:

Программное обеспечение не предусмотрено.

Варианты контрольных заданий по дисциплине представлены на сайтах: http://i-exam.ru.

Полезные учебно-методические и информационные материалы представлены на сайтах:

https://e.lanbook.com/journal/2560

https://e.lanbook.com/journal/2416

Электронная библиотека – https://online.mospolytech.ru/course/view.php?d=7621

ЭБС «Университетская библиотека онлайн» – https://biblioclub.ru

ЭБС «Лань» – https://e.lanbook.com

ЭБС «Znanium.com» – https://new.znanium.com

Образовательная платформа Юрайт – https://urait.ru

Национальная электронная библиотека – https://rusneb.ru

На компьютерах (кафедры, компьютерные классы) – по прямой ссылке http://172.16.3.18:8080/docs/ справочная система «Техэксперт» (АО «Кодекс»)

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Специализированная учебная лаборатория кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Ауд. АВ2406, оснащенная лабораторными установками:

- «Определение коэффициента температуропроводности стали методом регулярного режима»;
- «Определение коэффициента теплопередачи при вынужденном течении жидкости в трубе (труба в трубе)»;
- «Определение коэффициента теплопередачи методом регулярного режима»;
- «Определение коэффициента теплоотдачи при пузырьковом кипении жидкости на цилиндре»;
- «Определение коэффициента теплопроводности твердых тел методом цилиндрического слоя».

Мультимедийная аудитория кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Ауд. АВ2415, оснащенная оргтехникой и мультимедиа средствами (проектор, ПК

и др.), а также аудитории корпуса УРБАН.ТЕХНОГРАД Инновационно-образовательного комплексе «Техноград», который расположен на территории ВДНХ.

9. Методические рекомендации для преподавателя

Преподавание дисциплины «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» имеет своей целью ознакомить аспирантов с достижениями в области фундаментальных основ теплофизики, методами теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя, привить им практические навыки использования этих знаний.

Преподавание дисциплины осуществляется в соответствии с ФГОС ВО.

Целью методических рекомендаций является повышение эффективности теоретических и практических занятий вследствие более четкой их организации преподавателем, создания целевых установок по каждой теме, систематизации материала по курсу, взаимосвязи тем курса, полного материального и методического обеспечения образовательного процесса.

Средства обеспечения освоения дисциплины

При изучении дисциплины рекомендуется использовать следующие средства:

− рекомендуемую основную и дополнительную литературу;

− методические указания и пособия;

− контрольные задания для закрепления теоретического материала;

− электронные версии федеральных законов, учебников и методических указаний для выполнения практических работ и самостоятельной работы аспирантов.

Методические рекомендации по организации изучения дисциплины

Для максимального усвоения дисциплины рекомендуется изложение лекционного материала с элементами обсуждения.

В качестве методики проведения практических занятий можно предложить:

1. Семинар – обсуждение существующих точек зрения на проблему и пути ее решения.

2. Тематические доклады, позволяющие вырабатывать навыки публичных выступлений.

Для максимального усвоения дисциплины рекомендуется проведение письменного опроса (тестирование) аспирантов по материалам дисциплины. Подборка вопросов для тестирования осуществляется на основе изученного теоретического материала.

Для освоения навыков поисковой и исследовательской деятельности аспирант пишет контрольную работу или реферат по выбранной (свободной) теме.

Лекции проводятся в основном посредством метода устного изложения с элементами проблемного подхода и беседы.

Семинарские занятия могут иметь разные формы (работа с

исследовательской литературой, анализ данных нормативной и справочной литературы, слушание докладов и др.), выбираемые преподавателем в зависимости от интересов аспирантов и конкретной темы.

Самостоятельная работа аспирантов включает в себя элементы реферирования и конспектирования научно-исследовательской литературы, подготовки и написания научных текстов, отработку навыков устных публичных выступлений.

Проверка качества усвоения знаний в течение семестра осуществляется в устной форме, путем обсуждения проблем, выводимых на семинарах и письменной, путем выполнения аспирантами разных по форме и содержанию работ и заданий, связанных с практическим освоением содержания дисциплины. Аспиранты демонстрируют в ходе проверки умение анализировать значимость и выявлять специфику различных проблем и тем в рамках изучаемой дисциплины и ее компонентов, знание научной и учебно-методической литературы. Текущая проверка знаний и умений аспирантов также осуществляется через проведение ряда промежуточных тестирований. Итоговая аттестация по дисциплине предполагает экзамен, на которых проверяется усвоение материала, усвоение базовых понятий дисциплины.

Программа составлена в соответствии с Федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника» и профилю «Промышленная теплоэнергетика».

Автор

Доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика»
д.т.н., профессор С.Д. Корнеев

Программа обсуждена на заседании кафедры «Промышленная теплоэнергетика».
Протокол от 31.08.2020 г. № 1.

Заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»

к.т.н., доцент Л.А. Марюшин

Руководитель ООП С.Д. Корнеев

Приложение 1

Структура и содержание дисциплины «Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя» по направлению подготовки 13.06.01 «Электро- и теплотехника»

	Раздел	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов, и трудоемкость в часах					Виды самостоятельной работы студентов					Формы аттестации	
				Л	П/С	Лаб	СРС	КСР	К.Р.	К.П.	РГР	Реферат	К/р	Э	З
	Четвертый семестр	4													
Тема 1-2	**Примеры физических задач, требующих применения методов расчета, физического, математического и компьютерного моделирования, экспериментального исследования процессов тепло- и масообмена в аппаратах, установках и системах промышленной теплоэнергетики и технологии при фазовых и химических превращениях обрабатываемых веществ, материалов и теплоносителей. Достижения в этой области науки и техники за последние двадцать лет. Нерешенные проблемы.** **Условия возникновения конденсации пара. Пленочная и капельная конденсация. Коэффициент конденсации. Термическое сопротивление фазового перехода.** **Теоретический расчет теплообмена при конденсации практически неподвижного пара (ламинарное и турбулентное течение конденсата); сравнение с опытными данными и расчетные рекомендации. Влияние на теплоотдачу скорости пара. Конденсация пара внутри труб. Конденсация пара на горизонтальных трубах и пучках труб.** **Теплоотдача при капельной конденсации пара. Основные представления о механизме процесса, расчетные уравнения. Влияние перегрева, и влажности пара на коэффициент теплоотдачи. Особенности теплоотдачи при конденсации паров металлов.**	**4**	**1**	**2**			17	+								
	Расчет величины плотности теплового потока при изменении ориентации тепломассообменной поверхности в пространстве	4	1		4		4	+			+				
Тема 3	**Условия возникновения кипения. Перегрев жидкости и наличие центров парообразования как условия возникновения паровой фазы. Рост, отрыв и движение пузырей пара. Теплообмен при пузырьковом кипении между**	**4**	**2**	**2**			17	+							

	стенкой и жидкой фазой, между жидкой и паровой фазами. Механизм кипения жидкостей. Влияние свойств поверхности и давления системы. Рост паровых пузырей в области высоких и низких давлений. Особенности кипения жидких металлов и криогенных жидкостей. 1-й кризис теплоотдачи. Негидродинамические аспекты кризиса. Предельные оценки по $q_{пр}$ в каналах. При-рода 2-го кризиса кипения. Теплоотдача при пленочном кипении. **Анализ специальных условий совместности для переноса через границу в однокомпонентных системах. Оценка влияния неравновесных эффектов. Квазиравновесная схема. Зависимость коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока от температурного напора, давления, физических свойств жидкости, состояния поверхности и других факторов три кипении в большом объеме для пузырькового кипения. Пленочный режим. Первая и вторая критические плотности теплового потока. «Кризисы» второго рода.** **Структура и режимы течения при кипений внутри труб. Массовое и объемное расходные паросодержания. Скорость циркуляции. Развитие процесса по длине трубы.** **Метод обобщения опытных данных по теплообмену при пузырьковом кипении в большом объеме и в трубах. Обобщенные и частные эмпирические зависимости для коэффициентов теплоотдачи.** **Теплообмен при турбулентном режиме пленочного кипения жидкости. Зависимость первой и второй критических плотностей теплового потока от различных факторов. Особенности теплообмена при кипении жидких метал-лов.**														
	Расчет ректификационной установки *Расчет теплообменной установки с фазовыми преобразованиями теплоносителя*	4	2		4		4	+			+				
Тема 4	**Основные положения тепло- и массообмена в бинарных парогазовых смесях. Законы молекулярного переноса массы. Конвективный массообмен. Молекулярная и молярная диффузия и их связь с другими физическими процессами переноса. Концентрационная диффузия. Закон Фика. Коэффициенты молекулярной диффузии. Термо- и бародиффузия. Термодиффузионное от-ношение и коэффициент термодиффузии. Термо- и бародиффузия. Конвективный массообмен. Массоотдача. Коэффициенты массоотдачи. Стефанов поток при полупроницаемой поверхности раздела фаз.** **Дифференциальные уравнения совместного тепло- и массообмена в бинарных парогазовых смесях. Краевые условия. Стефанов поток. Аналогия процессов тепло- и массообмена в парогазовых смесях. Тройная аналогия.**	**4**	**3**	**2**			17	+							

	Условия выполнения аналогии и ее практическое использование. Диффузионный пограничный слой, результаты его расчета. Расчет коэффициентов тепло- и массоотдачи при испарении со свободной поверхности и из пористого тела. Особенности испарения из капилляров. Тепло- и массообмен при испарении жидкости в парогазовую среду. Уравнения баланса теплоты и массы. Диффузионный пограничный слой. Тепло- и массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси. Влияние проницаемости межфазной поверхности на процессы совместного тепло- и массопереноса. Процессы адиабатического и неадиабатического испарения. Методы определения коэффициентов тепло- и массоотдачи. Тепло- и массоотдача при конденсации смеси паров и пара из парогазовой смеси. Изменение концентраций и температур в парогазовой смеси. Распределение переносимого тепла по отдельным составляющим. Зависимость интенсивности теплообмена от содержания неконденсирующегося компонента при различных условиях протекания процесса.														
	Расчет испарительной установки *Расчет конденсатора паротурбинной установки*	4	3		4		4	+			+				
Тема 5-6	**Основные понятия. Краткие сведения из термохимии и химической кинетики. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена при химических превращениях. Краевые условия. Замороженное и равновесное течение реагирующих сред. Преобразованный закон Ньютона – Рихмана. Теплообмен между смесью реагирующих веществ и поверхностью раздела фаз. Энтальпия газа и смеси газов с учетом энергии образования. Краевые задачи для совместных процессов тепло- и маосообмена при наличии химических реакций; частные случаи, их аналогии с ранее изученными процессами. Особенности тепло- и маосообмена в диссоциированном и ионизирован-ном газах. Модификация закона Ньютона—Рихмана. Равновесные и неравновесные процессы.**	**4**	**4**	**2**			17	+							
	Расчет испарительного холодильника	4	4		4		4	+			+				
	Форма аттестации	4												Э	
	Всего часов по дисциплине в четвертом семестре			8	16	0	84	+			+				

Приложение 2

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(МОСКОВСКИЙ ПОЛИТЕХ)

Направление подготовки: 13.06.01 Электро- и теплотехника
ОП (профиль): «Промышленная теплоэнергетика»
Форма обучения: очная

Кафедра: «Промышленная теплоэнергетика»

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ

«Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя»

Москва
2020

Таблица 1
к приложению 2

Паспорт фонда оценочных средств

Методы теоретического анализа процессов с фазовыми преобразованиями теплоносителя					
ФГОС ВО **13.06.01 Электро- и теплотехника**					
КОМПЕТЕНЦИИ		**Перечень компонентов**	**Технология формирования**	**Форма оценочного средства**	**Степени уровней освоения компетенций**
ИНДЕКС	**ФОРМУЛИРОВКА**				
ОПК-1	владением методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности	**знать:** основные методы теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности **уметь:** проводить теоретические и экспериментальные исследования в области профессиональной деятельности **владеть:** методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности	Лекция, решение ситуационных задач, СРС	Экзамен, тестирование, решение ситуационных задач	Базовый уровень: владеет методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности. Повышенный уровень: владеет методологией теоретических и экспериментальных исследований в области профессиональной деятельности в нестандартных ситуациях с их последующим анализом

ПК-2	способность выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	**знать:** методы выполнения научных исследований в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля **уметь:** выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля **владеть:** способностью выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля	Лекция, семинарские занятия, решение ситуационных задач, СРС	Экзамен, тестирование, решение ситуационных задач	Базовый уровень: способен выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля в стандартных ситуациях. Повышенный уровень: способен выполнять научные исследования в научно-исследовательских организациях и учреждениях высшего образования теплоэнергетического профиля в нестандартных ситуациях с их последующим анализом

Приложение 3

Типовые контрольные задания или иные материалы, необходимые для оценки знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности, характеризующих этапы формирования компетенций в процессе освоения образовательной программы в рамках учебной дисциплины

Перечень практических работ по дисциплине

1. Расчет величины плотности теплового потока при изменении ориентации тепломассообменной поверхности в пространстве.
2. Расчет ректификационной установки.
3. Расчет теплообменной установки с фазовыми преобразованиями теплоносителя.
4. Расчет испарительной установки.
5. Расчет конденсатора паротурбинной установки.
6. Расчет испарительного холодильника.

Приложение 4

Вопросы для самоконтроля

1. Каковы основные процессы, протекающие фазовых и химических превращениях?
2. Каковы причины их частого применения в промышленной теплоэнергетике и технологии?
3. Каковы особенности тепловых эффектов при фазовых и химических превращениях?
4. Что такое скорость химической реакции и особенности ее протекания?
5. Какие основные виды режимов работы тепломассообменных аппаратов для реализации процессов с фазовыми и химическими превращениями?
6. Каковы причины, обусловливающие различие тепловых процессов при различных температурах?
7. Какие основные виды режимов работы промышленного тепломассообменного оборудования для осуществления фазовых и химических превращений?
8. Как влияют различные факторы на величину скорости химической реакции и интенсивность процессов испарения и конденсации?
9. Что такое тепловой эффект химической реакции?
10. Как изменяется величина плотности теплового потока при изменении ориентации тепломассообменной поверхности в пространстве?
11. Какие стадии процессов обработки веществ и материалов могут быть лимитирующими при фазовых и химических превращениях?
12. Основные представления о фазовых и химических превращениях.
13. Особенности тепломассообменных процессов при фазовых и химических превращениях.
14. Базовая система дифференциальных уравнений тепломассопереноса при

фазовых и химических превращениях.

15. Термодинамические основы процессов фазовых превращений.

16. Граничные условия при описании процессов переноса при фазовых и химических превращениях.

17. Свойства растворов, обрабатываемых выпариванием.

18. Кинетика химических реакций.

19. Виды и конструкции перегонных ректификационных установок.

20. Аккумуляторы теплоты и холода с фазовыми и химическими превращениями.

21. Химические реакторы для осуществления процессов с фазовыми изменениями.

22. Процессы сорбции и десорбции при получении природного газа.

23. Синтез-газ и возможности его получения и применения в промышленной теплоэнергетике.

24. Твердофазные аккумуляторы теплоты и холода.

25. Современные технологии применения аккумуляторов теплоты и холода.

26. Влияние структурных и технологических факторов на кинетику химических процессов.

27. Виды и типы выпарных аппаратов и установок.

Приложение 5

Вопросы к зачету

1. Примеры физических задач, требующих применения методов расчета, физического, математического и компьютерного моделирования, экспериментального исследования процессов тепло- и масобмена в аппаратах, установках и системах промышленной теплоэнергетики и технологии при фазовых и химических превращениях обрабатываемых веществ, материалов и теплоносителей.

2. Условия возникновения конденсации пара.

3. Пленочная и капельная конденсация.

4. Коэффициент конденсации.

5. Термическое сопротивление фазового перехода.

6. Теоретический расчет теплообмена при конденсации практически неподвижного пара (ламинарное и турбулентное течение конденсата); сравнение с опытными данными и расчетные рекомендации.

7. Влияние на теплоотдачу скорости пара.

8. Конденсация пара внутри труб.

9. Конденсация пара на горизонтальных трубах и пучках труб.

10. Теплоотдача при капельной конденсации пара.

11. Основные представления о механизме процесса, расчетные уравнения.

12. Влияние перегрева, и влажности пара на коэффициент теплоотдачи.

13. Особенности теплоотдачи при конденсации паров металлов.

14. Условия возникновения кипения.

15. Перегрев жидкости и наличие центров парообразования как условия возникновения паровой фазы.

16. Рост, отрыв и движение пузырей пара.

17. Теплообмен при пузырьковом кипении между стенкой и жидкой фазой, между жидкой и паровой фазами.

18. Механизм кипения жидкостей.

19. Влияние свойств поверхности и давления системы.

20. Рост паровых пузырей в области высоких и низких давлений.

21. Особенности кипения жидких металлов и криогенных жидкостей.

22. 1-й кризис теплоотдачи.

23. Негидродинамические аспекты кризиса.

24. Предельные оценки по $q_{пр}$ в каналах.

25. При-рода 2-го кризиса кипения.

26. Теплоотдача при пленочном кипении.

27. Анализ специальных условий совместности для переноса через границу в однокомпонентных системах.

28. Оценка влияния неравновесных эффектов. Квазиравновесная схема.

29. Зависимость коэффициента теплоотдачи и плотности теплового потока от температурного напора, давления, физических свойств жидкости, состояния поверхности и других факторов три кипении в большом объеме для пузырькового кипения.

30. Пленочный режим.

31. Первая и вторая критические плотности теплового потока.

32. «Кризисы» второго рода.

33. Структура и режимы течения при кипений внутри труб.

34. Массовое и объемное расходные паросодержания.

35. Скорость циркуляции. Развитие процесса по длине трубы.

36. Метод обобщения опытных данных по теплообмену при пузырьковом кипении в большом объеме и в трубах.

37. Обобщенные и частные эмпирические зависимости для коэффициентов теплоотдачи.

38. Теплообмен при турбулентном режиме пленочного кипения жидкости.

39. Зависимость первой и второй критических плотностей теплового потока от различных факторов.

40. Особенности теплообмена при кипении жидких металлов.

41. Основные положения тепло- и массообмена в бинарных парогазовых смесях.

42. Законы молекулярного переноса массы.

43. Конвективный массообмен.

44. Молекулярная и молярная диффузия и их связь с другими физическими процессами переноса.

45. Концентрационная диффузия.

46. Закон Фика.

47. Коэффициенты молекулярной диффузии.

48. Термо- и бародиффузия.

49. Термодиффузионное отношение и коэффициент термодиффузии.

50. Конвективный массообмен. Массоотдача. Коэффициенты массоотдачи.

51. Стефанов поток при полупроницаемой поверхности раздела фаз.

52. Дифференциальные уравнения совместного тепло- и массообмена в бинарных парогазовых смесях.

53. Диффузионный пограничный слой, результаты его расчета.

54. Расчет коэффициентов тепло- и массоотдачи при испарении со свободной поверхности и из пористого тела.

55. Особенности испарения из капилляров.

56. Тепло- и массообмен при испарении жидкости в парогазовую среду.

57. Уравнения баланса теплоты и массы.

58. Диффузионный пограничный слой.

59. Тепло- и массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси.

60. Влияние проницаемости межфазной поверхности на процессы совместного тепло- и массопереноса.

61. Процессы адиабатического и неадиабатического испарения.

62. Методы определения коэффициентов тепло- и массоотдачи.

63. Тепло- и массоотдача при конденсации смеси паров и пара из парогазовой смеси.

64. Изменение концентраций и температур в парогазовой смеси.

65. Распределение переносимого тепла по отдельным составляющим.

66. Зависимость интенсивности теплообмена от содержания неконденсирующегося компонента при различных условиях протекания процесса.

67. Дифференциальные уравнения тепло- и массообмена при химических превращениях. Краевые условия.

68. Замороженное и равновесное течение реагирующих сред.

69. Преобразованный закон Ньютона – Рихмана.

70. Теплообмен между смесью реагирующих веществ и поверхностью раздела фаз.

71. Энтальпия газа и смеси газов с учетом энергии образования.

72. Краевые задачи для совместных процессов тепло- и маосообмена при наличии химических реакций; частные случаи, их аналогии с ранее изученными процессами.

73. Особенности тепло- и маосообмена в диссоциированном и ионизированном газах.

74. Модификация закона Ньютона—Рихмана.

75. Равновесные и неравновесные процессы.

Приложение 6

Примеры задач для семинарских занятий

Задача 1. Расчет абсорбционной холодильной машины

1. Термодинамический расчет цикла.

Схема абсорбционной холодильной установки изображена на рис. 1. Процессы, протекающие в абсорбционной холодильной установке, показаны на рис. 2.

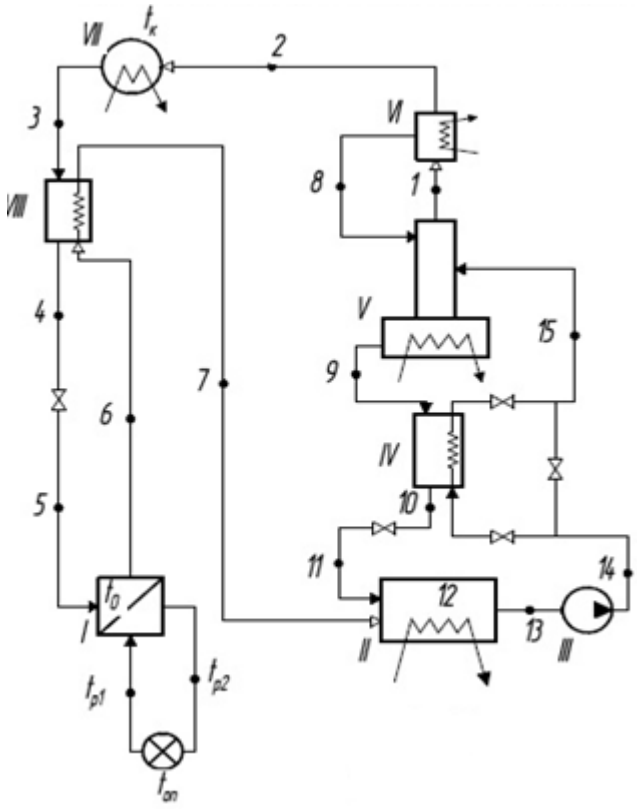


Рис. 1. Схема абсорбционной холодильной установки:
I – испаритель; II – абсорбер; III – насос крепкого раствора; IV – теплообменник раствора; V – ректификационная колонна; VI – конденсатор; VII - переохладитель

Т.к. температура охлаждаемого помещения $t_{оп} = -25°C$, то принимаем температуры рассола на входе и выходе из испарителя: $t_{р1} = -28°C$ и $t_{р2} = -26°C$.

Температура испарения:

$t_0 = t_{р1} - 5 = -28 - 5 = -33°C$.

Т.к. температура охлаждающей воды на входе в конденсатор $t_{в1} = 12°C$, то принимаем температуру воды на выходе $t_{в2} = t_{в1} + 5 = 17°C$.

Температура конденсации:

$t_к = t_{в2} + 7 = 17 + 7 = 24°C$.

По таблицам состояния насыщения для аммиака:

$P_0 = 0,1МПа = 1ama$,

$P_к = 0,97МПа = 9,7ama$

Температура крепкого раствора на выходе из абсорбера:

$t_{13} = t_{в2} + 5 = 17 + 5 = 22°C$.

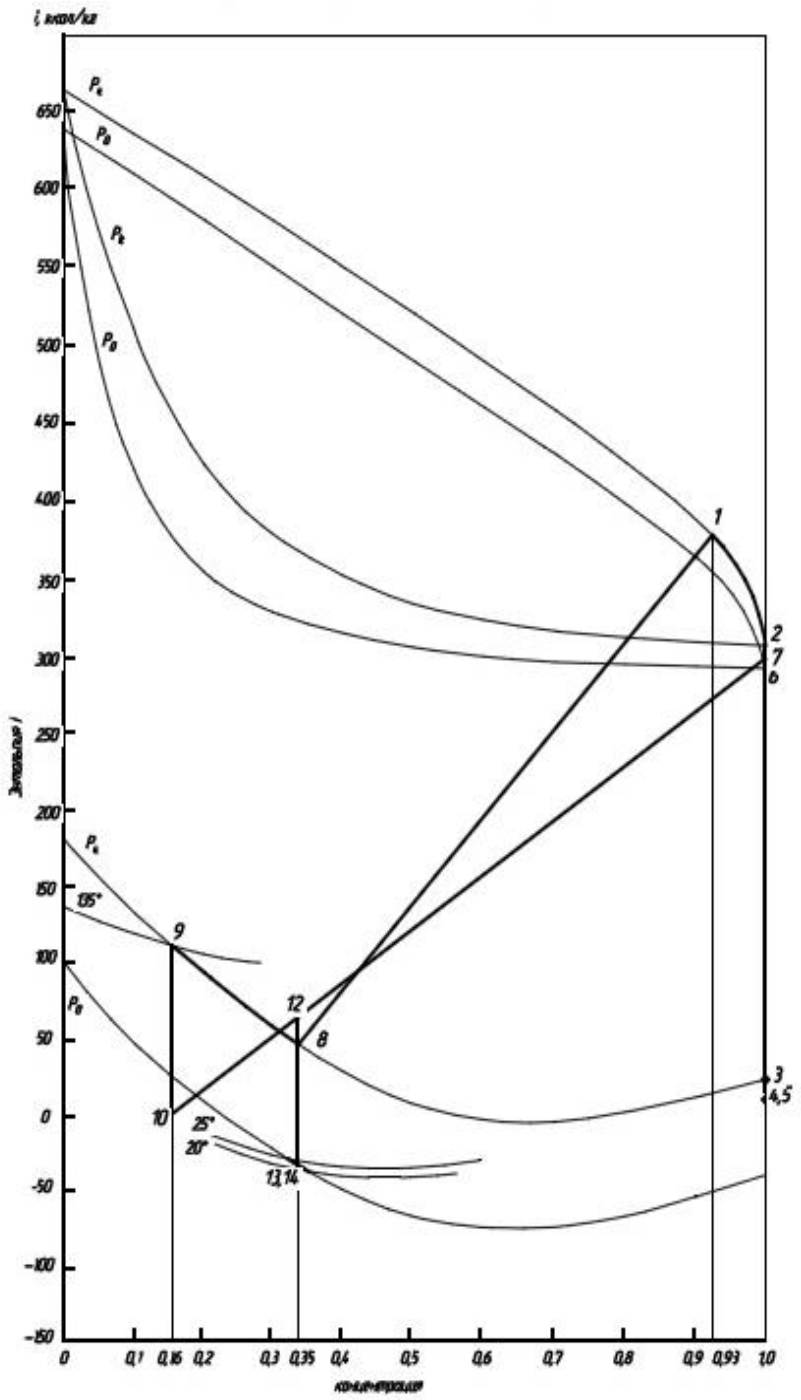


Рис. 2. Процессы абсорбционной установки

По давлению P_0 и температуре t_{13} определяем концентрацию раствора $\xi_{кр} = \xi_{13}$ и его энтальпию i_{13}.

$i_{13} = -35 ккал / кг$,

$\xi_{кр} = \xi_{13} = 0,35$.

Температура слабого раствора на выходе из генератора, принимая давление греющего пара $p_{гр.п.}$ = 0,35 МПа:

$t_9 = t_{гр.п} - 5 = 139 - 5 = 134°C$.

По давлению $P_к$ и по температуре t_9 определяем концентрацию слабого раствора $\xi_{сл} = \xi_9$ и его энтальпию i_9.

$i_9 = 122 ккал/кг$,

$\xi_{сл} = \xi_9 = 0{,}16$.

Кратность циркуляции (т.е. отношение массового расхода крепкого раствора к массовому расходу паров ХА из дефлегматора):

$$f = \frac{G_{кр}}{D} = \frac{G_{15}}{G_2} = \frac{\xi_2 - \xi_9}{\xi_{13} - \xi_9}.$$

При правильно организованном процессе дефлегмации и ректификации $\xi_2 \approx 1$, поэтому:

$$f = \frac{\xi_2 - \xi_9}{\xi_{13} - \xi_9} = \frac{1 - 0{,}16}{0{,}35 - 0{,}16} = 4{,}42.$$

Температура пара после дефлегматора должна на $\Delta t_д$ превышать температуру конденсации чистого агента при давлении $P_к$.

$t_2 = t_{в2} + \Delta t_д = 17 + 8 = 25°C$, $(t_2 > t_к)$

Его энтальпия определяется по диаграмме по $\xi_2 \approx 1$ и $P_к$.

$i_2 = 309 ккал/кг$.

По $i\xi$ диаграмме определяется параметры пара, равновесного кипящему крепкому раствору.

Жидкость:

$P_1 = P_8 = P_к$, $t_1 = t_8 = 85°C$, $i_8 = 49 ккал/кг$, $\xi_8 = \xi_{кр} = 0{,}35$.

Пар:

$P_1 = P_8 = P_к$, $t_1 = t_8 = 85°C$, $i_1 = 380 ккал/кг$, $\xi_1 = 0{,}93$.

Удельный отвод флегмы из дефлегматора (т.е. отношение массового расхода флегмы к массовому расходу пара на выходе из дефлегматора).

Флегмовое отношение:

$$\varphi = \frac{G_8}{G_2} = \frac{\xi_2 - \xi_1}{\xi_1 - \xi_8} = \frac{1 - 0{,}93}{0{,}93 - 0{,}35} = 0{,}12.$$

Удельная тепловая нагрузка дефлегматора , т.е. отвод теплоты из дефлегматора на единицу массового расхода пара из дефлегматора:

$q_д = (i_1 - i_8) + \varphi(i_1 - i_8) = (380 - 309) + 0{,}12(309 - 49) = 102{,}2 ккал/кг$.

Параметры слабого раствора после теплообменника:

$\xi_{14} = \xi_{сл} = 0{,}16$, $i_{13} = i_{14} = -35 ккал/кг$, $t_{14} = 22°C$,

$t_{10} = t_{14} + 8 = 22 + 8 = 30°C$,

$i_{10} = 6 ккал/кг$.

Энтальпия крепкого раствора на входе в генератор, пренебрегая приростом энтальпии раствора в насосе, вследствие малого значения этой величины, т.е. из условия $i_{13} = i_{14} = -35 ккал/кг$.

$$i_{15} = i_{13} + \frac{f - 1}{f}(i_9 - i_{10}) = -35 + \frac{4{,}42 - 1}{4{,}42}(122 - 6) = 54 ккал/кг.$$

Энтальпия крепкого раствора не должна превышать энтальпию кипящего раствора с концентрацией $\xi_{кр}$ при давлении $P_к$.

Энтальпия слабого раствора после теплообменника:

$i_{10} = i_9 - \frac{f}{f-1}(i_8 - i_{13}) = 122 - \frac{4,42}{4,42-1}(49 - (-35)) = 13 ккал/кг$.

Удельная тепловая нагрузка теплообменника:

$q_{то} = (f-1)(i_9 - i_{10}) = (4,42-1)(122-13) = 372,78 ккал/кг$.

Удельная тепловая нагрузка конденсатора:

$q_к = (i_2 - i_3) = 309 - 25 = 284 ккал/кг$,

где: $i_3 = 25 ккал/кг$ по диаграмме.

Температура паров ХА после охлаждения:

$t_7 = t_3 - 8 = 24 - 8 = 16°C$,

t_3 - температура жидкого ХА после конденсатора, т.е. $t_3 = t_к$.

Удельная тепловая нагрузка охладителя:

$q_{по} = i_7 - i_6 = 300 - 292 = 8 ккал/кг$,

энтальпия пара i_7 по диаграмме при P_0 и t_7.

Энтальпия жидкого аммиака перед дросселем:

$i_4 = i_3 - q_{по} = 25 - 8 = 17 ккал/кг$.

Удельная холодопроизводительность установки:

$q_0 = i_6 - i_5 = 292 - 17 = 275 ккал/кг$.

Удельное количество тепла, отводимое в адсорбере:

$q_а = i_7 - i_{10} + f(i_{10} - i_{13}) = 300 - 13 + 4,42(13 - (-35)) = 499,2 ккал/кг$.

Энтальпия точки смешения: $i_{12} = 67 ккал/кг$.

$q_а = f(i_{12} - i_{13}) = 4,42(67 - (-35)) = 450,8 ккал/кг$.

Удельная тепловая нагрузка генератора:

$q_г = i_1 - i_9 + f(i_9 - i_{15}) + \varphi(i_1 - i_8) = 380 - 122 + 4,42(122 - 54) + 0,12(380 - 49) = 598,3 ккал/кг$

Тепловой баланс установки:

$q_{подв} = q_г + q_о$, $q_{отв} = q_а + q_к + q_д$,

$q_{подв} = 598,3 + 275 = 873 ккал/кг$, $q_{отв} = 450,8 + 102,2 + 284 = 837 ккал/кг$,

расхождение баланса $\frac{873 - 837}{873} 100\% = 4\%$.

Расход ХА (аммиака):

$G = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{344000}{275} = 1,25 \cdot 10^3 кг/час$,

где: $Q_0 = 400 кВт = 344000 ккал/час$.

Тепловые нагрузки аппаратов:

- генератора $Q_г = G \cdot q_г = 1,25 \cdot 10^3 \cdot 598,3 = 747,9 \cdot 10^3 ккал/час$,
- абсорбера $Q_а = G \cdot q_а = 1,25 \cdot 10^3 \cdot 450,8 = 563,5 \cdot 10^3 ккал/час$,
- охладителя $Q_о = G \cdot q_о = 1,25 \cdot 10^3 \cdot 8 = 10 \cdot 10^3 ккал/час$,
- конденсатора $Q_к = G \cdot q_к = 1,25 \cdot 10^3 \cdot 284 = 355 \cdot 10^3 ккал/час$,
- дефлегматора $Q_д = G \cdot q_д = 1,25 \cdot 10^3 \cdot 102,2 = 127,8 \cdot 10^3 ккал/час$,
- теплообменника $Q_{то} = G \cdot q_{то} = 1,25 \cdot 10^3 \cdot 372,8 = 466 \cdot 10^3 ккал/час$.

Удельный расход тепла:

$$\frac{q_г}{q_o} = \frac{Q_г}{Q_o} = \frac{747,9}{344} = 2,17 .$$

Холодильный коэффициент:

$$\varepsilon = \frac{q_o}{q_г} = \frac{275}{598,3} = 0,46 .$$

2. Тепловой расчет генератора.

В качестве исходных данных имеем:

- количество дистиллята $G_d = 0,347 кг/с$,
- массовое содержание аммиака в исходной смеси $a_f = 0,35$,
- массовое содержание аммиака в дистилляте $a_d = 0,92$,
- массовое содержание аммиака в кубовом остатке $a_w = 0,16$,
- флегмовое отношение $R = 0,12$,
- кратность циркуляции $f = 4,42$.

Определяем количество исходной смеси и кубового остатка по следующим формулам:

$$G_f = G_d \cdot f = 0,347 \cdot 4,42 = 1,534 кг/с ,$$

$$G_w = G_d \cdot (f-1) = 0,347 \cdot (4,42-1) = 1,187 кг/с .$$

Определяем молярные доли аммиака в исходной смеси, дистилляте и кубовом остатке. Молекулярная масса аммиака $\mu_a = 17 г/моль$, воды $\mu_в = 18 г/моль$.

$$x_f = \frac{\frac{a_f}{\mu_a}}{\frac{a_f}{\mu_a} + \frac{b_f}{\mu_b}} = \frac{\frac{35}{17}}{\frac{35}{17} + \frac{65}{18}} = 0,36 ,$$

$$x_d = \frac{\frac{a_d}{\mu_a}}{\frac{a_d}{\mu_a} + \frac{b_d}{\mu_b}} = \frac{\frac{92}{17}}{\frac{92}{17} + \frac{8}{18}} = 0,924 ,$$

$$x_w = \frac{\frac{a_w}{\mu_a}}{\frac{a_w}{\mu_a} + \frac{b_w}{\mu_b}} = \frac{\frac{16}{17}}{\frac{16}{17} + \frac{84}{18}} = 0,168 .$$

Для определения числа тарелок графическим методом строим диаграмму равновесия для бинарной смеси аммиак – вода.

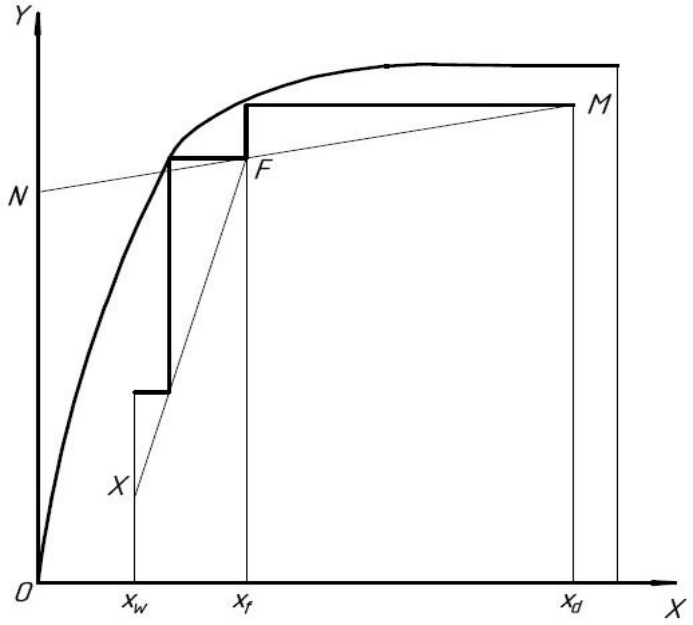


Рис. 3. Диаграмма равновесия для бинарной смеси «аммиак-вода»

Таблица 1

Таблица равновесия для бинарной смеси аммиак-вода

Температура	$a_{ж}$	a_n	x	y
190	0	0	0	0
160	0,11	0,52	0,116	0,534
140	0,184	0,744	0,199	0,755
125	0,24	0,85	0,25	0,857
111	0,3	0,9	0,31	0,905
80	0,46	0,976	0,474	0,977
60	0,584	0,999	0,6	0,999
40	0,81	0,9999	0,82	0,9999
33	1	1	1	1

$$ON = \frac{x_d}{R+1} = \frac{0,924}{0,12+1} = 0,825$$

$$y_F^* = 91,4\%$$

Определяем минимальное флегмовое число:

$$R_{\min} = \frac{x_d - y_F^*}{y_F^* - x_f} = \frac{92,4-91,4}{91,4-36} = 0,018$$

По графику равновесия определяем действительное число тарелок $n_T = 3$. Одну тарелку используем на насадку.

Принимая КПД тарелки $\eta_т$=0,5, определяем действительное число тарелок:

$$n_д = \frac{n_T}{\eta_T} = \frac{2}{0,5} = 4$$

Уравнения рабочих линий:

а) верхней части колонны:

$$y = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{x_d}{R+1} = \frac{0,12}{0,12+1} \cdot x + \frac{0,924}{0,12+1} = 0,107 \cdot x + 0,825$$

б) нижней части колонны:

$$y = \frac{R+f}{R+1} \cdot x - \frac{(f-1) \cdot x_w}{R+1} = \frac{0,12+4,42}{0,12+1} \cdot x + \frac{(4,42-1) \cdot 0,16}{0,12+1} = 4,05 \cdot x - 0,513$$

Средние концентрации жидкости:

а) верхней части колонны:

$$x_{ср}^I = \frac{x_f + x_d}{2} = \frac{0,36+0,924}{2} = 0,642$$

б) нижней части колонны:

$$x_{ср}^{II} = \frac{x_f + x_w}{2} = \frac{0,36+0,168}{2} = 0,264$$

Средние концентрации пара находим по уравнениям рабочих линий:

а) верхней части колонны:

$$y_{ср}^I = 0,107 \cdot x + 0,825 = 0,107 \cdot 0,642 + 0,825 = 0,894$$

б) нижней части колонны

$$y_{ср}^{II} = 4,05 \cdot x - 0,513 = 4,05 \cdot 0,264 - 0,513 = 0,556$$

Средние температуры пара определяем по диаграмме (рис.2):

а) верхней части колонны:

$t_{ср}^I = 119$ при $y_{ср}^I = 0,894$

б) нижней части колонны:

$t_{ср}^{II} = 158$

Средние мольные массы и плотности пара:

а) $\mu_{ср}^I = y_{ср}^I \cdot \mu_а + (1 - y_{ср}^I) \cdot \mu_в = 0,894 \cdot 17 + (1 - 0,894) \cdot 18 = 17,106 кг / моль$,

$$\rho_{ср}^I = \frac{\mu_{ср}^I \cdot \mathrm{T}_0}{22,4 \cdot \mathrm{T}_{ср}^I} = \frac{17,106 \cdot 273}{22,4 \cdot (273+119)} = 0,532 кг / м^3.$$

б) $\mu_{ср}^{II} = y_{ср}^{II} \cdot \mu_а + (1 - y_{ср}^{II}) \cdot \mu_в = 0,556 \cdot 17 + (1 - 0,556) \cdot 18 = 17,44 кг / моль$,

$$\rho_{ср}^{II} = \frac{\mu_{ср}^{II} \cdot \mathrm{T}_0}{22,4 \cdot \mathrm{T}_{ср}^2} = \frac{17,44 \cdot 273}{22,4 \cdot (273+158)} = 0,493 кг / м^3.$$

Средняя плотность пара в колонне:

$$\rho_п = \frac{\rho_{ср}^1 + \rho_{ср}^{11}}{2} = \frac{0,532+0,493}{2} = 0,51 кг / м^3.$$

Температура вверху колонны при $x_d = 0,924$ равняется $t_а = 36°C$, а в кубе-испарителе при $x_w = 0,168$ она равняется $t_в = 147,5°C$. Плотность жидкого аммиака при $t_а = 36°C$ $\rho_а = 586 кг / м^3$, а воды при $t_в = 147,5°C$ $\rho_в = 919 кг / м^3$. Принимаем среднюю плотность жидкости в колонне:

$$\rho_{ж} = \frac{\rho_а + \rho_в}{2} = \frac{586+919}{2} = 752,3 кг / м^3.$$

$$\omega = c \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ж}}{\rho_n}} = 0,032 \cdot \sqrt{\frac{752,3}{0,51}} = 1,23 м/с$$

Объемный расход проходящего через колонну пара при средней температуре в колонне

$$t_{ср} = \frac{t_{ср}^{I} + t_{ср}^{II}}{2} = \frac{119+158}{2} = 138,5^0 C,$$

$$V = \frac{G_d \cdot (R+1) \cdot 22,4 \cdot T_{ср}}{\mu_d \cdot T_0} = \frac{0,347 \cdot (0,12+1) \cdot 22,4 \cdot (273+138,5)}{17,076 \cdot 273} = 0,77 м^3/с,$$

где:

$\mu_d = y \cdot \mu_a + (1-y) \cdot \mu_в = 0,924 \cdot 17 + (1-0,924) \cdot 18 = 17,076 г/моль$.

Диаметр колонны:

$$D_k = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{0,77}{0,785 \cdot 1,23}} = 0,893 м$$

Принимаем диаметр колонны $D_k = 1000 мм$, тогда скорость пара в колонне будет равна:

$$\omega = \frac{V}{0,785 \cdot D_k^2} = \frac{0,77}{0,785 \cdot 1^2} = 0,98 м/с$$

Высота тарелочной части колонны:

$H_T = (n_д - 1) \cdot h_T$,

где: h_T - расстояние между тарелками.

Для диаметра колонны $D_k = 1000 мм$ принимаем расстояние между тарелками равным $h_T = 0,3 м$. Тогда:

$H_T = (n_д - 1) \cdot 0,3 = (4-1) \cdot 0,3 = 0,9 м$.

Произведем расчет насадочной части колонны. Выбираем насадку из керамических колец Рашига.

Для беспорядочно засыпанных керамических колец Рашига размером 25×25×3 мм: удельная поверхность $\sigma = 195 м^2/м^3$ и свободный объем $V_c = 0,75 м^2/м^3$.

Диаметр насадочной части колонны:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}}$$

Скорость пара определяется следующим путем. Сначала рассчитываем фиктивную скорость пара $\omega_з$ в точке захлебывания (инверсии) по уравнению (при $\rho_{ж} >> \rho_n$):

$$\lg\left(\frac{\omega_з^2 \cdot \sigma \cdot \rho_0 \cdot \mu_{ж}^{0,16}}{g \cdot V_c^3 \cdot \rho_{ж}}\right) = A - 1,75\left(\frac{G}{D}\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_{ж}}{\rho_n}\right)^{0,125},$$

где: σ - удельная поверхность насадки, $м^2/м^3$;

g - ускорение свободного падения, $м/с^2$;

V_c - свободный объем насадки, $м^2/м^3$;

$\rho_{ж}$ и ρ_n - плотности пара и жидкости, $кг/м^3$;

$\mu_{ж} = 0,89 мПа \cdot с$ - динамический коэффициент вязкости жидкости;

G и D – массовые расходы жидкости и пара, $кг/с$;

A=0,125 – для ректификационных колонн в режиме эмульгирования;

$\frac{G}{D} = \frac{R+f}{R+1}$, где $f = \frac{x_d - x_w}{x_f - x_w} = \frac{0,924-0,168}{0,36-0,168} = 3,94$.

$$\frac{G}{D} = \frac{R+f}{R+1} = \frac{0,12+3,94}{0,12+1} = 3,63$$

$$\lg\left(\frac{\omega_з^2 \cdot 195 \cdot 0,51 \cdot 0,89^{0,16}}{9,81 \cdot 0,75^3 \cdot 752,3}\right) = -0,125 - 1,75\left(3,63\right)^{0,25} \cdot \left(\frac{0,51}{752,3}\right)^{0,125}$$

$$\lg\left(\omega_з^2 \cdot 0,0311\right) = -1,176,$$

$$\omega_з^2 = 2,48(м/с)^2,$$

$$\omega_з = 1,57 м/с.$$

Определяем рабочую скорость пара для колонн, работающих в пленочном режиме:

$$\omega_п = (0,75 \div 0,9) \cdot \omega_з$$

$$\omega_п = 0,8 \cdot 1,57 = 1,26 м/с$$

$$D_н = \sqrt{\frac{0,77}{0,785 \cdot 1,26}} = 0,882 м$$

Принимаем диаметр насадочной части колонны $D_н = 1000 мм$.

Определяем высоту насадочной части колонны:

$$h_э = k \cdot \frac{d_{нас} \cdot \mu_п \cdot \rho}{6 \cdot \psi \cdot T_{см}},$$

где: k - эмпирический коэффициент для большинства органических жидкостей; для керамических колец принимается равным- 88;

$d_{нас}$ - диаметр выбранных колец насадки, мм;

$\mu_п$=35 – молекулярная масса разгоряченной смеси;

ρ - плотность флегмы, $г/см^3$;

ψ - коэффициент, учитывающий смачивание насадки, $\psi = 0,4 \div 0,6$;

$T_{см}$ - средняя температура в колонне, К;

$$h_э = 88 \cdot \frac{25 \cdot 35 \cdot 0,752,3}{6 \cdot 0,5 \cdot (273+138,5)} = 47 см,$$

Высота насадочной части:

$H_н = n_T \cdot h_э = 470 \cdot 1 = 470 мм$.

Определяем высоту колонны:

$H_т = 0,9 м$, $H_н = 0,47 м$, $H_к = 2 м$.

$H_{к.н} = (2 \div 3) \cdot D_к = 2 \cdot 1000 = 2000 мм = 2 м$;

$H_{сеп} = (0,5 \div 1) \cdot D_к = 0,5 \cdot 1000 = 500 мм = 0,5 м$;

Расстояние между тарельчатой частью и насадкой примем равной 450 мм. Тогда:

$$H = H_т + H_н + H_к + H_{к.н} + H_{сеп} = 0,9 + 0,47 + 2 + 2 + 0,5 = 5,87 м$$

3. Расчет испарителя

Тепловой расчет испарителя для охлаждения жидкого хладоносителя, рассола – раствора NH_3 в воде, ведут по формуле:

$Q_и = k_и \cdot F_и \cdot \Delta t_{ср}$.

Если заданная холодопроизводительность установки равна Q_o , то с учетом тепловых потерь в окружающую среду тепловая нагрузка испарителя определится формулой:

$Q_и = 1,08 \cdot Q_o = 1,08 \cdot 400 = 432 кВт$.

$k_{и.ор} = 400 Вт/(м^2 К)$,

$$\Delta t_{ср} = \frac{t_{р1} - t_{р2}}{\ln \frac{t_{р1} - t_o}{t_{р2} - t_o}} = \frac{-28 + 26}{\ln \frac{-28 + 33}{-26 + 33}} = 5,9,$$

Тогда:

$$F_{и.ор} = \frac{Q_и}{K_{и.ор} \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{432}{400 \cdot 5,9} = 180 м^2.$$

Выбираем аммиачный кожухотрубчатый испаритель завода "Компрессор" марки 180-ИКТ.

Количество рассола, циркулирующего в системе испарителя,

$$G_р = \frac{Q_и}{c_р (t_{р2} - t_{р1})} = \frac{432}{2,916(-26 + 28)} = 74,1 кг/с,$$

где: $c_р = 2,916$кДж/кг – изобарная теплоемкость рассола,

$t_{р1} = -26°C$ - температура рассола на входе в испаритель,

$t_{р2} = -28°C$ - температура рассола на выходе из испарителя.

Скорость движения рассола в трубах испарителя определяется по формуле:

$$\omega = \frac{G_р}{\rho_р \cdot f_{хода}} = \frac{74,1}{1210 \cdot 0,0266} = 2,3 м/с$$

где: $\rho_р = 1210 кг/м^3$ – плотность рассола,

$f_{хода}$ – площадь сечения одного хода по трубам, определяется по формуле:

$$f_{хода} = \frac{\pi \cdot d_{вн}^2}{4} \cdot \frac{n}{z} = \frac{\pi \cdot (0,025 - 2 \cdot 0,002)^2}{4} \cdot \frac{614}{8} = 0,0266 м^2$$

здесь $d_{вн} = 0,021 м$ – внутренний диаметр труб испарителя,

$n = 614$ - общее число труб,

$z = 8$ - число ходов труб испарителя.

Коэффициент теплопередачи испарителя определяется двумя методами, результаты которых сравнивают.

I метод

Коэффициент теплопередачи:

$$K_и' = \frac{Q_и}{F_и \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{432 \cdot 10^3}{180 \cdot 5,9} = 407 Вт/(м^2 К)$$

где: $F_и = 180 м^2$ – поверхность теплообмена испарителя; определяется по

типоразмеру испарителя,

$\Delta t_{ср}$ - средняя разность температур между аммиаком и рассолом, определяется по выражению:

$$\Delta t_{ср} = \frac{t_{р1} - t_{р2}}{\ln \frac{t_{р1} - t_o}{t_{р2} - t_o}} = \frac{-26 + 28}{\ln \frac{-26 + 33}{-28 + 33}} = 5,9$$

где: $t_o = -33°C$ – температура испарения аммиака.

II метод

Тепловой поток через трубы испарителя находят по формуле:

$$q = \frac{Q_и}{F_и} = \frac{432 \cdot 10^3}{180} = 2400 Вт / м^2$$

Коэффициент теплопередачи определяется по выражению:

$$K_и^{"} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_а} \cdot \frac{d_{вн}}{d_н} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_м}{\lambda_т} + \frac{\delta_с}{\lambda_с} + \frac{1}{\alpha_р}} Вт/(м^2 К)$$

где: $\alpha_а$ – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к аммиаку;

$\alpha_р$ - коэффициент теплоотдачи от рассола к стенке трубы;

$d_{вн}$ и $d_н$ – диаметр труб, соответственно внутренний и наружный;

$\delta_{ст}$, $\delta_м$, $\delta_с$ – толщина стенки труб, слоя загрязнения маслом и отложением соли, соответственно;

$\lambda_{ст}$, $\lambda_м$, $\lambda_с$ – коэффициент теплопроводности металла трубы, масла и соли.

Для аммиачных испарителей принимают:

$\delta_м = 0,05..0,08 мм$,

$\lambda_м = 0,14 Вт/(м \cdot К)$,

$\delta_с = 0,3..0,5 мм$,

$\lambda_с = 0,7 Вт/(м \cdot К)$.

Термическим сопротивлением стенки трубы $\delta_{ст}/\lambda_{ст}$ в расчете можно пренебречь. Величина коэффициента $\alpha_а$ определяется из выражения:

$$\alpha_а = 4,2(1 + 0,007 t_0) q^{0,7} = 4,2(1 + 0,007 \cdot (-33)) \cdot 2400^{0,7} = 750 Вт/(мК)$$

Величина коэффициента $\alpha_р$ находится по формуле:

$$\alpha_р = \frac{Nu \cdot \lambda_р}{d_{вн}}$$

где: Nu – критерий Нуссельта;

$\lambda_р = 0,463 Вт/(мК)$ – коэффициент теплопроводности рассола.

Значение критерия Нуссельта определяют из критериального уравнения: $Nu = 0,023 \cdot \mathrm{Re}^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4}$

в котором:

$$G_р = \frac{Q_и}{c_р \cdot (t_{р1} - t_{р2})} = \frac{432}{2,916 \cdot 2} = 74,07 кг/с,$$

$$\omega = \frac{G_p}{\rho_p \cdot f_{хода}} = \frac{74,07}{1210 \cdot 0,0266} = 2,3 м/с,$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_{вн}}{\nu_p} = \frac{\omega \cdot d_{вн} \cdot \rho_p}{\mu_p} = \frac{2,3 \cdot 0,021 \cdot 1210}{0,009015} = 6482,9$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu_p}{a_p} = \frac{\mu_p \cdot c_p}{\lambda_p} = \frac{0,009015 \cdot 2,916 \cdot 10^3}{0,463} = 57$$

$$Nu = 0,023 \cdot \mathrm{Re}^{0,8} \cdot \mathrm{Pr}^{0,4} = 0,023 \cdot 6482,9^{0,8} \cdot 57^{0,4} = 130.$$

здесь: $\mu_p = 0,009015 Па \cdot с$ - динамический коэффициент вязкости рассола.

Тогда:

$$\alpha_p = \frac{Nu \cdot \lambda_p}{d_{вн}} = \frac{130 \cdot 0,463}{0,021} = 2866 Вт/(м^2 К).$$

$$K_u^{"} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_a} \cdot \frac{d_{вн}}{d_н} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{\delta_м}{\lambda_т} + \frac{\delta_с}{\lambda_с} + \frac{1}{\alpha_p}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{750} \cdot \frac{0,021}{0,025} + \frac{0,0004}{0,7} + \frac{0,00008}{0,14} + \frac{1}{2866}} = 383 Вт/(м^2 К)$$

.

4. Гидравлический расчет тракта подачи исходной смеси в генератор

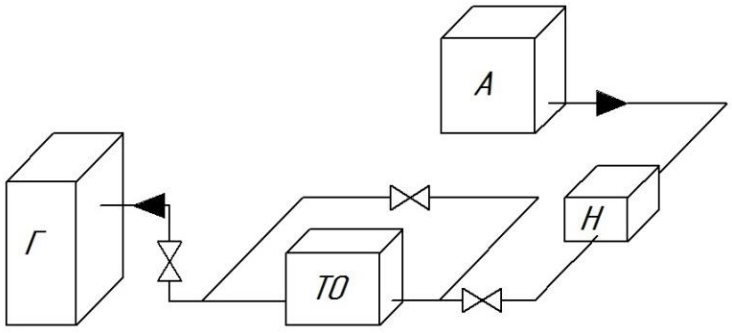


Рис. 4. Схема трубопровода подачи крепкого раствора в генератор

Так как в тракт подачи исходной смеси в генератор входит теплообменник раствора, то нам необходимо выполнить конструктивный расчёт данного теплообменника.

Расчёт теплообменника.

Тепловая нагрузка аппарата $Q_{то} = G \cdot q_{то} = 1,25 \cdot 10^3 \cdot 372,8 = 466 \cdot 10^3 ккал/час$.

Средняя разность температур между греющим паром и раствором:

$$\Delta t = \frac{(t_н - t_г^{'}) - (t_н - t_г^{"})}{\ln \frac{t_н - t_г^{'}}{t_н - t_г^{"}}} = \frac{(134 - 85) - (30 - 22)}{\ln \frac{134 - 85}{30 - 22}} = 22,6^0 C$$

;

Принимаем коэффициент теплопередачи $k = 1000 \frac{ккал}{м^2 ч^0 С}$;

Поверхность нагрева аппарата:

$$F = \frac{Q}{k \cdot \Delta t} = \frac{466000}{1000 \cdot 22,6} = 20,6 м^2 .$$

Выбираем двухтрубный теплообменник.

Диаметр внутренней трубы $d_1 = 38/33 мм$; диаметр наружной трубы $d_1 = 76/70 мм$; слабый раствор направляется в трубу меньшего диаметра.

Общая длина труб:

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d} = \frac{20,6}{3,14 \cdot 0,033} \approx 198 м ;$$

Число труб при длине одной трубы $l = 3 м$

$$n = \frac{L}{l} = \frac{198}{3} \approx 66 м ;$$

Скорости движения слабого и крепкого раствора:

$$\omega_{сл} = \frac{4 \cdot \left(G_f - G\right)}{3600 \pi \rho_в d_1^2} = \frac{4\left(5522 - 1250\right)}{3600 \cdot \pi \cdot 950 \cdot \left(0,033\right)^2} = 1,5 м / с ;$$

$$\omega_{кр} = \frac{4 \cdot G}{3600 \pi \rho_{NH_3} d_{экв}^2} = \frac{4 \cdot 1250}{3600 \cdot \pi \cdot 590 \cdot \left(0,070 - 0,033\right)^2} = 0,55 м / с ;$$

Гидродинамический расчёт теплообменника раствора.

Полный напор:

$$\Delta p_{то} = \sum \Delta p_м + \sum \Delta p_{пт} + \sum \Delta p_у + \sum \Delta p_{гс} ;$$

где: $\sum \Delta p_{пт}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей теплообменника;

$\sum \Delta p_м$ - сумма потерь напора за счёт местных сопротивлений;

$\sum \Delta p_у$ - сумма потерь, обусловленных ускорением потока (у нас $\sum \Delta p_у = 0$);

$\sum \Delta p_{гс}$ - затраты напора для преодоления гидростатического столба жидкости (у нас теплообменник включён в замкнутую сеть, а значит $\sum \Delta p_{гс} = 0$); значит:

$$\Delta p = \sum \Delta p_м + \sum \Delta p_{пт} ,$$

$$\sum \Delta p_м = \sum \xi \frac{\rho \omega_{кр}^2}{2}, \sum \Delta p_{пт} = \lambda \frac{l}{d_{экв}} \frac{\rho \omega_{кр}^2}{2},$$

здесь:

λ - коэффициент сопротивления трения;

ξ - коэффициент местного сопротивления;

l - длина труб;

$d_{экв}$ - эквивалентный диаметр трубы;

ρ - плотность крепкого раствора;

$\omega_{кр}$ - скорость движения крепкого раствора в трубах теплообменника.

$$\sum \Delta p_м = \sum \xi \frac{\rho \omega_{кр}^2}{2} = \left(2 \cdot 1,5 + 66 \cdot 0,5\right) \frac{590 \cdot \left(0,55\right)^2}{2} = 3212,6 Па ;$$

$$\sum \Delta p_{пт} = \lambda \frac{l}{d_{экв}} \frac{\rho \omega_{кр}^2}{2} ;$$

Определим λ:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega_{кр} \cdot d_{экв}}{\nu_p} = \frac{0,55(0,070 - 0,033)}{0,018 \cdot 10^{-6}} = 1130556;$$

где: $\nu_p = 0,018 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ - кинематический коэффициент вязкости при $P_к = 9,7 ат$, $t = 35^0 C$.

Т.к. $\mathrm{Re} = 925000 \geq 10^5$, то коэффициент сопротивления трения определяем по формуле Никурадзе:

$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{\mathrm{Re}^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{1130556^{0,237}} = 0,011$; тогда:

$$\sum \Delta p_{пт} = \lambda \frac{l}{d_{экв}} \cdot \frac{\rho \omega_{кр}^{\ 2}}{2} = 0,011 \cdot \frac{198}{0,037} \cdot \frac{590 \cdot (0,55)^2}{2} = 5253 Па;$$

Полная потеря напора в теплообменнике:

$\Delta p_{то} = \sum \Delta p_м + \sum \Delta p_{пт} = 3212,6 + 5253 = 8465,6 Па$;

Гидродинамический расчёт трубопровода.

а) В случае включения в тракт подачи смеси теплообменника раствора.

$\Delta p_{тр} = \sum \Delta p_м + \sum \Delta p_{пт}$;

где: $\sum \Delta p_{пт}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода;

$\sum \Delta p_м$ - сумма потерь напора за счёт местных сопротивлений;

$$\sum \Delta p_м = \sum \xi \frac{\rho \omega_{кр}^{\ 2}}{2} = (4 \cdot 1 + 2 \cdot 0,5) \frac{590 \cdot (1,5)^2}{2} = 3319 Па;$$

где: $\omega_{кр}$ - скорость движения крепкого раствора в трубопроводе;

ξ - коэффициент местного сопротивления;

l - длина труб;

$d_{тр} = 57/51 мм$ - диаметр трубопровода;

ρ - плотность крепкого раствора.

$\sum \Delta p_{пт} = \sum \Delta p_{пт1} + \sum \Delta p_{пт2} + \sum \Delta p_{пт3}$;

где: $\sum \Delta p_{пт1}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода на участке трубопровода от абсорбера до насоса;

$\sum \Delta p_{пт2}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода на участке трубопровода от насоса до теплообменника;

$\sum \Delta p_{пт3}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода на участке трубопровода от теплообменника до генератора;

$$\sum \Delta p_{пт1} = \lambda_1 \frac{l_1}{d_{тр}} \frac{\rho \omega^2}{2};$$

Определим λ_1:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_{тр}}{\nu_{p1}} = \frac{1,5 \cdot 0,051}{0,014 \cdot 10^{-6}} = 54,6 \cdot 10^5;$$

где: $\nu_{p1} = 0,014 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ - кинематический коэффициент вязкости при $P_o = 1 ат$,

$t = 22^0 C$.

Т.к. $\mathrm{Re} = 54,6 \cdot 10^5 \geq 10^5$, то коэффициент сопротивления трения определяем по формуле Никурадзе:

$$\lambda_1 = 0,0032 + \frac{0,221}{\mathrm{Re}^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{\left(54,6 \cdot 10^5\right)^{0,237}} = 0,008793;$$

тогда:

$$\sum \Delta p_{nm1} = \lambda_1 \frac{l_1}{d_{mp}} \cdot \frac{\rho\omega^2}{2} = 0,008793 \cdot \frac{3}{0,051} \cdot \frac{590 \cdot (1,5)^2}{2} = 343,3 Па.$$

$$\sum \Delta p_{nm2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_{mp}} \frac{\rho\omega^2}{2};$$

Определим λ_2:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_{mp}}{\nu_{p2}} = \frac{1,5 \cdot 0,051}{0,25 \cdot 10^{-6}} = 3,1 \cdot 10^5;$$

где: $\nu_{p2} = 0,25 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{c}$ - кинематический коэффициент вязкости при $P_к = 9,7 ат$, $t = 22^0 C$.

Т.к $\mathrm{Re} = 3,1 \cdot 10^5 \geq 10^5$, то коэффициент сопротивления трения определяем по формуле Никурадзе:

$$\lambda_2 = 0,0032 + \frac{0,221}{\mathrm{Re}^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{(3,1 \cdot 10^5)^{0,237}} = 0,0142;$$

тогда:

$$\sum \Delta p_{nm2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_{mp}} \cdot \frac{\rho\omega^2}{2} = 0,0142 \cdot \frac{4}{0,051} \cdot \frac{590 \cdot (1,5)^2}{2} = 739,2 Па.$$

$$\sum \Delta p_{nm3} = \lambda_3 \frac{l_3}{d_{mp}} \frac{\rho\omega^2}{2};$$

Определим λ_3:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_{mp}}{\nu_{p3}} = \frac{1,5 \cdot 0,051}{0,024 \cdot 10^{-6}} = 3,2 \cdot 10^6;$$

где: $\nu_{p3} = 0,024 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{c}$ - кинематический коэффициент вязкости при $P_к = 9,7 ат$, $t = 85^0 C$.

Т.к. $\mathrm{Re} = 32 \cdot 10^5 \geq 10^5$, то коэффициент сопротивления трения определяем по формуле Никурадзе:

$$\lambda_3 = 0,0032 + \frac{0,221}{\mathrm{Re}^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{(32 \cdot 10^5)^{0,237}} = 0,00955;$$ тогда:

$$\sum \Delta p_{nm3} = \lambda_3 \frac{l_3}{d_{mp}} \cdot \frac{\rho\omega^2}{2} = 0,00955 \cdot \frac{7,5}{0,051} \cdot \frac{590 \cdot (1,5)^2}{2} = 932,2 Па;$$

Сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода:

$$\sum \Delta p_{nm} = \sum \Delta p_{nm1} + \sum \Delta p_{nm2} + \sum \Delta p_{nm3} = 343,3 + 739,2 + 932,2 = 2014,7 Па;$$

Полная потеря напора в трубопроводе в случае включения в тракт подачи смеси теплообменника раствора:

$\Delta p_{тр} = \sum \Delta p_{м} + \sum \Delta p_{пт} = 3319 + 2014,7 = 5333,7 Па$;

Суммарная потеря напора в тракте подачи исходной смеси в генератор в указанном случае:

$\sum \Delta p = \Delta p_{то} + \Delta p_{тр} = 8465,6 + 5333,7 = 13799,3 Па$;

б) В случае выключения из тракта подачи смеси теплообменника раствора.

$\Delta p_{тр} = \sum \Delta p_{м} + \sum \Delta p_{пт}$;

где: $\sum \Delta p_{пт}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода; $\sum \Delta p_{м}$ - сумма потерь напора за счёт местных сопротивлений;

$$\sum \Delta p_{м} = \sum \xi \frac{\rho \omega^2}{2} = (8 \cdot 1 + 3 \cdot 0,5) \frac{590 \cdot (1,5)^2}{2} = 6305,63 Па;$$

где: ω - скорость движения крепкого раствора в трубопроводе;

ξ - коэффициент местного сопротивления;

l - длина труб;

$d_{тр} = 57/51 мм$ - диаметр трубопровода;

ρ - плотность крепкого раствора.

$\sum \Delta p_{пт} = \sum \Delta p_{пт1} + \sum \Delta p_{пт2} + \sum \Delta p_{пт3}$;

где: $\sum \Delta p_{пт1}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода на участке трубопровода от абсорбера до насоса;

$\sum \Delta p_{пт2}$ - сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода на участке трубопровода от насоса до генератора;

$$\sum \Delta p_{пт1} = \lambda_1 \frac{l_1}{d_{тр}} \frac{\rho \omega^2}{2};$$

Определим λ_1:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_{тр}}{\nu_{р1}} = \frac{1,5 \cdot 0,051}{0,014 \cdot 10^{-6}} = 5,46 \cdot 10^6;$$

где: $\nu_{р1} = 0,014 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ - кинематический коэффициент вязкости при $P_o = 1 ат$, $t = 22^0 C$.

Т.к. $\mathrm{Re} = 5,46 \cdot 10^6 \geq 10^5$, то коэффициент сопротивления трения определяем по формуле Никурадзе:

$\lambda_1 = 0,0032 + \frac{0,221}{\mathrm{Re}^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{(5,46 \cdot 10^6)^{0,237}} = 0,008793$; тогда:

$$\sum \Delta p_{пт1} = \lambda_1 \frac{l_1}{d_{тр}} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2} = 0,008793 \cdot \frac{3}{0,051} \cdot \frac{590 \cdot (1,5)^2}{2} = 343,3 Па;$$

$$\sum \Delta p_{пт2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_{тр}} \frac{\rho \omega^2}{2};$$

Определим λ_2:

$$\mathrm{Re} = \frac{\omega \cdot d_{тр}}{\nu_{р2}} = \frac{1,5 \cdot 0,051}{0,25 \cdot 10^{-6}} = 3,1 \cdot 10^{5};$$

где: $\nu_{р2} = 0,25 \cdot 10^{-6} \frac{м^2}{с}$ - кинематический коэффициент вязкости при $P_к = 9,7 ат$, $t = 22^0 C$.

Т.к. $\mathrm{Re} = 3,1 \cdot 10^5 \geq 10^5$, то коэффициент сопротивления трения определяем по формуле Никурадзе:

$$\lambda_2 = 0,0032 + \frac{0,221}{\mathrm{Re}^{0,237}} = 0,0032 + \frac{0,221}{(3,1 \cdot 10^5)^{0,237}} = 0,0142;$$

тогда:

$$\sum \Delta p_{пт2} = \lambda_2 \frac{l_2}{d_{тр}} \cdot \frac{\rho \omega^2}{2} = 0,0142 \cdot \frac{21}{0,051} \cdot \frac{590 \cdot (1,5)^2}{2} = 3881 Па;$$

Сумма гидравлических сопротивлений поверхностей трубопровода:

$$\sum \Delta p_{пт} = \sum \Delta p_{пт1} + \sum \Delta p_{пт2} = 343,3 + 3881 = 4224,3 Па;$$

Полная потеря напора в трубопроводе в случае выключения из тракта подачи смеси теплообменника раствора:

$$\Delta p_{тр} = \sum \Delta p_{м} + \sum \Delta p_{пт} = 6305,63 + 4224,3 = 10529,93 Па.$$