

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Блинова Светлана Павловна

Должность: Заместитель директора по учебно-воспитательной работе

Дата подписания: 2020.02.11.02:52

Уникальный программный ключ:

1cafd4e102a27ce11a89a2a7feb20237f3ab5c65

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Норильский государственный индустриальный институт»
Политехнический колледж

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ РАБОТ
для студентов очной формы обучения
по специальности
13.02.01 Тепловые электрические станции

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕПЛОТЕХНИКИ

Методические указания к выполнению самостоятельных работ для студентов очной формы обучения специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции по дисциплине **«Теоретические основы теплотехники»**

Организация-разработчик: Политехнический колледж ФГБОУ ВО «Норильский государственный индустриальный институт»

Разработчик:
Стрельникова Лилия Ивановна, преподаватель

Рассмотрена на заседании цикловой комиссии
Тепловых электрических станций

Председатель комиссии _____ Семенова С.И.

Утверждена методическим советом политехнического колледжа ФГБОУ ВО «Норильский государственный индустриальный институт».

Протокол заседания методического совета №__ от «__» _____ 20__ г.

Зам. директора по УР _____ С.П. Блинова

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Тематический план	6
2 Общие методические указания по выполнению работ.....	7
3 Тематика выполнения самостоятельной работы.....	8
Список использованных источников.....	70

ВВЕДЕНИЕ

Программой дисциплины предусматривается изучение технической термодинамики и теплопередачи, исследования закономерностей взаимного превращения тепловой и механической энергии, переноса теплоты теплопроводностью, конвекцией, излучением и основ расчета теплообменников.

Программой дисциплины так же предусмотрены 62 часа на самостоятельную работу студентов с книгами для изучения нового материала, самостоятельного решения практических задач, выполнение рефератов и разработку плакатов.

В результате освоения дисциплины обучающийся по специальности 13.02.01 Тепловые электрические станции

должен уметь:

- определять параметры состояния газа, рассчитывать газовую смесь;
- определять теплоемкость отдельного газа и смеси;
- проводить анализ основных термодинамических процессов;
- изображать газовые циклы в диаграммах; использовать таблицы и диаграммы для решения задач для идеальных и реальных газов;
- определять состояние и параметры водяного пара;
- производить расчеты при истечении и дросселировании газов и паров.
- производить расчеты по определению плотности теплового потока, температуры, термического сопротивления теплопроводности одного- и многослойной стенок;
- определять коэффициент теплоотдачи, теплопередачи, термического сопротивления теплоотдачи и теплопередачи,
- соблюдать правила технической безопасности при выполнении лабораторных работ;

В результате освоения учебной дисциплины обучающийся

должен знать:

- основные газовые законы, газовые смеси;
- теплоемкость газов и газовых смесей;
- законы термодинамики; термодинамические процессы идеальных газов;
- газовые циклы;
- водяной пар и его свойства; диаграммы и таблицы водяного пара;
- термодинамические процессы водяного пара;
- циклы паротурбинных установок;
- процессы передачи теплоты;
- основные положения и законы конвективного теплообмена;
- основные понятия и законы теплового излучения;

В процессе освоения дисциплины студент должен овладеть общими компетенциями:

ОК 1. Понимать сущность и социальную значимость своей будущей

профессии, проявлять к ней устойчивый интерес.

ОК 2. Организовывать собственную деятельность, определять методы и способы выполнения профессиональных задач, оценивать их эффективность и качество.

ОК 3. Решать проблемы, оценивать риски и принимать решения в нестандартных ситуациях.

ОК 4. Осуществлять поиск, анализ и оценку информации, необходимой для постановки и решения профессиональных задач, профессионального и личностного развития.

ОК 5. Использовать информационно-коммуникационные технологии для совершенствования профессиональной деятельности.

ОК 6. Работать в коллективе и команде, обеспечивать ее сплочение, эффективно общаться с коллегами, руководством, потребителями.

ОК 7. Ставить цели, мотивировать деятельность подчиненных, организовывать и контролировать их работу с принятием на себя ответственности за результат выполнения заданий.

ОК 8. Самостоятельно определять задачи профессионального и личностного развития, заниматься самообразованием, осознанно планировать повышение квалификации.

ОК 9. Быть готовым к смене технологий в профессиональной деятельности.

В процессе освоения дисциплины студент должен овладевать профессиональными компетенциями:

ПК 1.1. Проводить эксплуатационные работы на основном и вспомогательном оборудовании котельного цеха, топливоподдачи и мазутного хозяйства.

ПК 1.2. Обеспечивать подготовку топлива к сжиганию.

ПК 1.3. Контролировать работу тепловой автоматики и контрольно-измерительных приборов в котельном цехе.

ПК 2.1. Проводить эксплуатационные работы на основном и вспомогательном оборудовании турбинного цеха.

ПК 2.2. Обеспечивать водный режим электрической станции.

ПК 2.3. Контролировать работу тепловой автоматики, контрольно-измерительных приборов, электрооборудования в турбинном цехе.

ПК 4.1. Управлять параметрами производства тепловой энергии.

ПК 4.2. Определять технико-экономические показатели работы основного и вспомогательного оборудования ТЭС.

ПК 4.3. Оптимизировать технологические процессы.

ПК 5.2. Проводить инструктажи и осуществлять допуск персонала к работам.

ПК 5.3. Контролировать состояние рабочих мест и оборудования на участке в соответствии с требованиями охраны труда.

ПК 5.4. Контролировать выполнение требований пожарной безопасности.

1 ТЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН

Вид самостоятельной работы	Наименование разделов и тем
	Раздел 1. Основы технической термодинамики (24ч.)
Написание рефератов	Параметры состояния тела. Основные газовые законы. Газовые смеси (2ч.)
Изучение темы и конспектирование	Второй закон термодинамики. Энтропия. Круговые циклы. Циклы Карно (1ч.) Регенеративный цикл ГТУ. (2ч.)
Изучение темы и конспектирование	Поршневые компрессоры (4ч.)
Изучение темы и конспектирование Решение задач	Водяной пар и его свойства. Термодинамические процессы водяного пара. P, v, I, S и T, S – диаграммы (5ч.)
Изучение темы и конспектирование	Истечение. Дросселирование газов и паров (6ч.)
Изучение темы и конспектирование	Циклы паротурбинных установок (4ч.)
	Раздел 2. Основы теплопередачи (19ч.)
Изучение темы и конспектирование	Конвективный теплообмен (2ч.)
Изучение темы и конспектирование	Теплообмен и теплоотдача при конденсации и кипении (6ч.)
Изучение темы и конспектирование	Теплообмен излучением. Основные понятия и законы (2ч.)
Изучение темы и конспектирование	Теплообменные аппараты (9ч.)

2 ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Самостоятельная работа преследует цель углубления знаний студента, выступает формой самоконтроля.

Самостоятельная работа выполняется в отдельной тетради.

Выполнение самостоятельной работы включает в себя: самостоятельное изучение тем и ответы на вопросы самоконтроля знаний, решение задач, написание реферата на одну из выбранных тем и ответы на один из вариантов тестовых заданий.

Перед изучением каждой темы нужно внимательно прочитать методические указания и выполнить работу в строгом соответствии с ними.

После изучения нового теоретического материала студенты должны сделать краткий конспект темы, ответить письменно на вопросы для самопроверки, решить приведенные в пособие задачи, либо выполнить указанное после темы задание.

Работа должна быть правильно оформлена:

- написана разборчиво;
- лист бумаги должен иметь поля (не менее 2,5 см);
- составлен список изученной литературы;
- страницы должны быть пронумерованы;
- последний лист оставить свободным для рецензии.

Самостоятельная работа выполняется в сроки установленные графиком учебного процесса.

Если работа не зачтена, то необходимо выполнить рекомендации по доработке в той же тетради и представить ее вновь на рецензирование.

Основания для незачета самостоятельной работы:

- отсутствие вопросов перед ответами;
- неверные, неточные и неконкретные ответы на поставленные вопросы;
- несамостоятельный характер выполнения;
- неправильное, небрежное оформление работы.

2.1 Методические указания к самостоятельному изучению тем

Самостоятельное изучение темы включает в себя следующие этапы выполнения работы:

- 1) Внимательно прочтите весь параграф.
- 2) Разберитесь с тем, что означают новые термины и определения.
- 3) Тщательно изучите рисунки, схемы, диаграммы.
- 4) Внесите в тетрадь записи важных определений и понятий, а так же указанные в задании схемы и рисунки.

5) После выполнения в конспекте рисунков и схем необходимо пояснить их. После написания формул необходимо также указать единицы измерения.

6) Запишите ответы на вопросы для самопроверки

Конспект должен быть выполнен кратко и с логичным изложением материала. Работа должна быть выполнена аккуратно, четким разборчивым подчерком.

2.2 Методические указания к выполнению самостоятельного решения задач

Номер варианта задачи соответствует порядковому номеру студента в журнале. Вычисления выполняются с точностью до 2 значащих цифр, после запятой. Использовать размерность системы СИ. Размерность физических величин в окончательных результатах указывать обязательно.

При оформлении решения задач необходимо полностью записать условие задачи, затем выписать отдельно (можно в табличной форме) исходные данные с указанием единиц измерения. Перед каждым математическим действием необходимо пояснить, какая величина определяется по указанной формуле. Формула сначала записывается в буквенном выражении, затем в нее подставляются численные значения и только потом пишется ответ с указанием единиц измерения. В конце задачи отдельно пишется ответ или при необходимости вывод.

Тематика выполнения самостоятельной работы

Тема: Второй закон термодинамики. Энтропия. Круговые циклы. Циклы Карно. Циклы поршневых ДВС, газотурбинных установок (Зч.)

Студент должен:

знать:

сущность второго и третьего законов термодинамики; понятия о круговых процессах, прямых и обратных циклах, обратимых и необратимых процессах; цикле Карно; понятие и физический смысл энтропии; циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинных установок (ГТУ), определение их термического КПД при различных способах подвода теплоты;

уметь:

изображать циклы в PV и Ts -диаграммах; производить термодинамический расчет циклов и определять их термический коэффициент полезного действия (КПД), проводить сравнение термических КПД циклов при различных способах подвода теплоты.

Вопросы темы:

Второй закон термодинамики. Круговые процессы или циклы. Термический коэффициент полезного действия цикла, работа цикла, количество подведенной и отведенной в цикле теплоты.

Второй закон термодинамики для обратимых и необратимых процессов. Энтропия, ее физический смысл. Т,s-диаграмма. .

Понятие прямого и обратного цикла. Равновесное и неравновесное состояние рабочего тела. Идеальный цикл Карно, его изображения в P, v-диаграмме. Термический коэффициент полезного действия цикла Карно. Изображение термодинамических процессов изменения состояния газа в циклах Карно в Т,s- диаграмме. Третий закон термодинамики недостижимости тела абсолютного нуля, его следствие

Регенеративный цикл ГТУ. Пути увеличения термического КПД циклов ГТУ

Основные теоретические положения

Второй закон термодинамики. Энтропия (1ч.).

Второй закон термодинамики определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем.

Второй закон термодинамики математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq dQ / T,$$

где dS - бесконечно малое приращение энтропии системы, т.е. изменение;

dQ – бесконечно малое количество тепла, полученного системой от источника тепла;

T – абсолютная температура источника тепла.

Знак неравенства соответствует необратимым процессам, а знак равенства – обратимым. Следовательно, аналитическое выражение второго закона термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса имеет вид

$$dQ = T \cdot dS$$

В данном уравнении величина T всегда положительна, поэтому dS и dq по знаку одинаковы. Значит, если в процессе теплота подводится, то энтропия газа увеличивается. Если в процессе теплота отводится, то энтропия газа уменьшается.

Основным уравнением для определения изменения энтропии в обратимом процессе является выражение

$$dS = dq / T,$$

где величина S – называется *энтропией*, которая представляет собой параметр состояния вещества. Особым свойством энтропии является то, что сумма ее небольших изменений по всему контуру произвольного обратимого цикла равна нулю. В технической термодинамике имеют дело не с абсолютным значением энтропии, а с ее изменением. Отсчет значения энтропии можно вести от любого состояния. Для газов принято считать значение энтропии равным нулю при нормальных условиях, т.е. при $t=0$ °С и $P=760$ мм рт ст.

Чтобы вычислить изменение энтропии в каком либо процессе необходимо из значения энтропии в конечном состоянии вычесть значение энтропии в начальном состоянии

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

Круговые циклы

Процессы, в которых рабочее тело, пройдя ряд различных состояний, возвращается в исходное состояние, называются *круговыми процессами*, или *циклами*. Циклы бывают *прямые* и *обратные*. Прямые циклы осуществляются в *тепловых машинах*, в которых теплота переходит в работу, а обратные – в холодильных установках, где работа переходит в теплоту.

Если процессы, входящие в цикл, равновесные и обратимые, то цикл *обратимый*.

Если какой либо процесс, входящий в цикл, неравновесный, то и весь цикл будет неравновесный и необратимый.

Полезно использованная теплота в цикле определяется по формуле:

$$q = q_1 - q_2, \text{ кДж}$$

где q_1 – теплота, подводимая к рабочему телу от горячего источника, кДж

q_2 – теплота, отдаваемая рабочим телом холодному источнику, кДж

В круговых циклах работа расширения считается положительной и обозначается l_1 , работа сжатия считается отрицательной и обозначается l_2 .

Полезная работа цикла $l_{ц}$ равна разности работ расширения и сжатия

$$l_{ц} = l_1 - l_2, \text{ кДж}$$

Степень термодинамического совершенства прямого цикла характеризуется термическим коэффициентом полезного действия (к.п.д.), который представляет собой отношение работы цикла к подводимой теплоте и обозначается η_t , т.е

$$\eta_t = l_{ц} / q_1 = 1 - (q_2 / q_1)$$

Цикл Карно

Прямой обратимый цикл Карно является идеальным циклом тепловых машин и осуществляется при наличии горячего источника постоянной температуры T_1 и холодного источника постоянной температуры T_2 .

Цикл состоит из двух изотермических и двух адиабатных процессов.

Термический к.п.д. цикла определяется по той же формуле, как и у кругового цикла.

Обратный цикл Карно состоит из тех же процессов, что и прямой, но изменение состояния газа происходит в обратном порядке. Обратный цикл Карно является идеальным циклом *холодильных установок*.

Степень термодинамического совершенства обратного цикла характеризуется холодильным коэффициентом:

$$\varepsilon = q_2 / 1_{ц}$$

Второй закон термодинамики можно сформулировать следующим образом:

- 1) В круговом процессе подводимая теплота не может быть полностью превращена в работу;
- 2) для превращения теплоты в работу необходим иметь не только нагреватель, но и холодильник с более низкой температурой. Т.е. необходим температурный перепад;
- 3) Теплота не может сама собой переходить от тел с низшей температурой к телам с более высокой температурой.

Циклы газотурбинных установок (2ч.)

Газотурбинные установки (ГТУ) по сравнению с поршневыми ДВС обладают существенными преимуществами, что способствует их внедрению в различные отрасли народного хозяйства в качестве энергетических установок.

Эти установки могут выполняться быстроходными и обладать большой мощностью при малых габаритах.

Работа газотурбинных установок характеризуется непрерывностью во всех элементах.

Расширение рабочего тела в газовой турбине происходит до атмосферного давления, что обеспечивает более высокие к.п. циклов, чем в поршневых двигателях.

Для повышения экономичности газотурбинных установок осуществляется регенерация теплоты, которая заключается в передаче теплоты от отработавших газов к воздуху в регенеративном подогревателе.

Задание

- 1) Изучить темы: «Круговые процессы (циклы)», «Второй закон термодинамики», «Газовые циклы тепловых двигателей» по учебнику, выполнить краткий конспект.
- 2) Письменно ответить на вопросы для самопроверки знаний

Вопросы для самопроверки знаний

1. Какие процессы (циклы) называются круговыми.
2. Какие циклы называются прямыми и обратными.
3. Что собой представляет цикл Карно.
4. Из каких термодинамических процессов состоит цикл Карно
5. Какие процессы (циклы) называются обратимыми и необратимыми.
6. Какое состояние тела называется равновесным и неравновесным.
7. Что собой представляет работа цикла, полезно используемая теплота.
8. Определение термического коэффициента полезного действия цикла

Карно.

9. Охарактеризовать понятие энтропии.

10. В чем заключается сущность второго и третьего закона термодинамики.

11. Изобразить схему газотурбинной установки с изобарным подводом теплоты при полной регенерации и описать принцип ее работы.

12. Изобразить T,S-диаграмму цикла ГТУ с изобарным подводом тепла при полной регенерации.

13. Изобразить T,S-диаграмму цикла ГТУ с двухступенчатым расширением газов и двухступенчатым сжатия воздуха.

14. Записать выражение определения КПД цикла ГТУ при постоянном давлении.

15. Изобразить T,S-диаграмму цикла ГТУ с изохорным подводом тепла

16. Записать выражение определения КПД цикла ГТУ с подводом тепла при постоянном объеме.

117. Каким образом можно повысить термический КПД циклов ГТУ.

Рекомендуемая литература:

Л[1, с.54-100; с.60; 2, с.117-135]

Тема: Поршневые компрессоры (4ч.)

Студент должен:

знать:

термодинамические основы работы компрессоров; принцип работы одно- и многоступенчатого компрессора при изотермическом, адиабатном и политропном сжатии, индикаторные диаграммы работы компрессора;

уметь:

строить PV и Ts-диаграммы компрессора и определять величину теоретической работы.

Термодинамические основы работы компрессоров. Принцип работы одноступенчатого компрессора при изотермическом, адиабатном, политропном сжатии.

Многоступенчатое сжатие в компрессоре. Изображение цикла компрессора в P,v- и T,s-диаграммах.

Вопросы темы:

Термодинамические основы работы компрессоров. Принцип работы одно- и многоступенчатого компрессора при изотермическом, адиабатном и политропном сжатии. Теоретические индикаторные диаграммы работы компрессора. Многоступенчатое сжатие в компрессоре. Изображение цикла компрессора в PV и TS-диаграммах. Определение величины теоретической работы компрессора в цикле при различных видах сжатия.

Основные теоретические положения

Получение сжатых газов и их перемещение по трубопроводам к месту потребления осуществляется при помощи машин, которые называются *компрессорами*.

Сжатый воздух применяется в пневмоинструментах, в тормозных устройствах на транспорте, а также для пуска, продувки и распыливания жидкого топлива в двигателях внутреннего сгорания. Компрессоры являются важнейшими агрегатами газотурбинных установок и холодильных машин.

Одноступенчатым поршневым компрессором называется компрессор с одним цилиндром.

Многоступенчатые компрессоры

Для получения сжатых газов высокого давления применяются многоступенчатые компрессоры, конструктивно представляющие собой систему последовательно соединенных одноступенчатых компрессоров, между которыми устанавливаются холодильники.

Газ последовательно проходит через ступени компрессора и в каждой из них повышает давление на определенную величину. После каждого сжатия газ поступает в промежуточные холодильники и при постоянном давлении охлаждается до начальной температуры, при которой газ всасывается в первую ступень. Такой способ получения сжатого газа замедляет возрастание давления в каждом цилиндре, и влияние вредного пространства на производительность компрессора уменьшается.

Задание

1) Изучить тему: «*Поршневые компрессоры*» по учебнику, выполнить краткий конспект и ответить на вопросы для самопроверки знаний.

Вопросы для самопроверки знаний

1. Какие компрессоры называются одноступенчатые и многоступенчатые.
2. Пояснить принцип работы компрессора.
3. Какой компрессор называется идеальным
4. Что является рабочим телом в компрессорных установках
5. Изобразить схему одноступенчатого компрессора и описать принцип его работы.
6. Что собой представляет индикаторная диаграмма компрессора . Изобразить ее и охарактеризовать линии нанесенные на диаграмму.
7. Изобразить в P, v - и T, s -диаграммы работы компрессора при различных процессах сжатия.
8. Что называется вредным пространством в компрессоре.
9. Записать формулу работы компрессора и пояснить величины входящие в нее.

10. Изобразить принципиальную схему работы многоступенчатого компрессора и его P, v - диаграмму. Описать принцип его работы.

11. Перечислить область применения компрессорных установок

Рекомендуемая литература:

Л[1, с.92; 2, с.139-149; 5, с.119; 301]

Тема : Водяной пар и его свойства. P, v и T, s - i, s -диаграммах.

Термодинамические процессы водяного пара (5ч.)

Студент должен:

знать:

уравнение состояния реальных газов; свойства и параметры состояния водяного пара, процесс парообразования, его изображение в PV , Ts и i, s -диаграммах; характеристики и параметры влажного насыщенного, сухого и перегретого пара.

уметь:

определять параметры водяного пара с помощью таблиц водяных паров, i, s -диаграммы; изображать процесс парообразования в PV , Ts и i, s -диаграммах; производить вычисления параметров влажного насыщенного пара с использованием таблиц водяного пара и математических зависимостей.

Вопросы темы:

Водяной пар и его свойства. Свойства реальных газов, характеристическое уравнение реальных газов Ван- дер-Ваальса. Сублимация. Изучение и работа с диаграммами водяного пара PV , TS и IS . Теплота жидкости, парообразования перегрева пара. Изучение и работа с таблицами термодинамических свойств воды и водяного пара. Термодинамические процессы водяного пара

Основные теоретические положения

Водяной пар применяется в качестве рабочего тела в паровых турбинах, которые являются в настоящее время тепловыми двигателями на тепловых электрических станциях.

Как теплоноситель, водяной пар широко используется в технологических процессах многих отраслей народного хозяйства.

Водяной пар не подчиняется законам идеальных газов, т.к. при конденсации переходит в жидкое состояние.

Таблицы водяного пара

При различных расчетах и изучении процессов, протекающих в водяном паре, используются таблицы водяного пара (таблицы П5 - П7 Приложение А), составленными на основании экспериментальных данных. Табличный метод расчета тепловых процессов достаточно сложен, поэтому на практике

широко применяется графический метод с использованием I,S - диаграммы водяного пара, составленной по таблицам М.П. Вукаловича.

Основными процессами являются: изобарный ($P = const$), изохорный ($v = const$), изотермический ($T = const$), и адиабатный ($dq = 0$).

Каждый из этих процессов может протекать целиком в области влажного или перегретого пара. Но может протекать и таким образом, что в начальном состоянии пар будет влажный, а в конечном перегретый (или наоборот).

При решении задач с использованием таблиц необходимо сначала установить состояние водяного пара вначале и в конце процесса.

Для определения состояния рабочего тела при заданном давлении P сравнивают любой известный параметр (v, i, S, t) с соответствующим параметром сухого пара (таблица П6) (Приложение А).

Например, известно начальное значение энтропии - S , тогда, если:

1) $S' < S < S''$ – то в рассматриваемом состоянии пар будет влажным, насыщенным. В этом случае необходимо найти степень сухости x из уравнения:

$$S_x = S'' \cdot x + (1-x) \cdot S', \quad \text{отсюда } x = \frac{S - S'}{S'' - S'}.$$

Остальные параметры из уравнений:

$v_x = v'' \cdot x + (1-x) \cdot v'$ – удельный объем влажного насыщенного пара;

$i_x = i'' \cdot x + (1-x) \cdot i' = i' + r \cdot x$ – энтальпия влажного насыщенного пара;

$U_x = i' - P \cdot v_x$ – внутренняя энергия влажного насыщенного пара.

2) Если $S = S''$, то пар будет сухим и необходимые параметры находят по таблицам сухого насыщенного пара П5 или П6 (Приложение А).

Если $S > S''$ - пар будет перегретый и все необходимые параметры определяют по таблицам перегретого пара П7 (Приложение А)

3) Если $S < S''$ - в рассматриваемом состоянии будет вода недогретая до кипения и все параметры находятся по таблице П7 (Приложение А).

С помощью I,S - диаграммы можно по двум известным параметрам определить все основные термодинамические величины для любого состояния пара, а так же проследить изменения состояния пара при различных термодинамических процессах. Большое значение при изучении паровых двигателей имеет определение с помощью I,S - диаграммы энтальпии водяного пара и разности энтальпий в виде отрезков при адиабатном процессе. I,S - диаграмма водяного пара приведена на рис. 2.1.

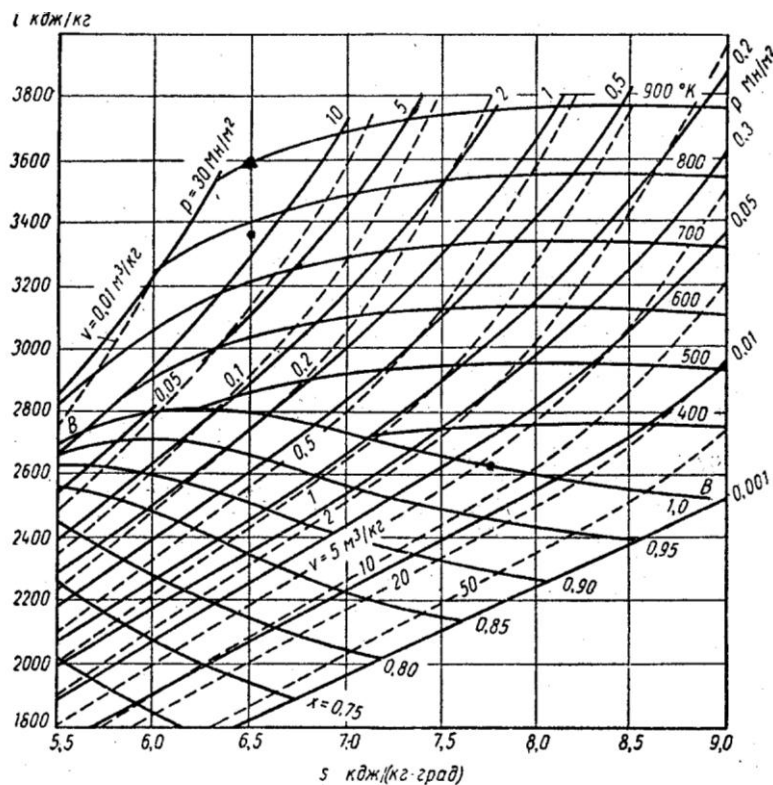


Рисунок 2.1 - I,S – диаграмма водяного пара

При решении задач по I,S - диаграмме состояние рабочего тела определяют как точку пересечения любых двух линий и все параметры (за исключением - I) находят из диаграммы.

Адиабатный процесс ($dq = 0$)

В обратимом адиабатном процессе энтропия не меняется ($S = const$), поэтому в I,S и T,S - диаграммах адиабата вертикальная линия.

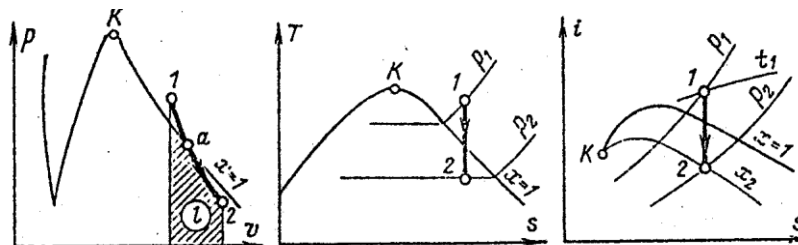


Рисунок 2.2 - Адиабатный процесс для водяного пара

В P,v - диаграмме адиабата изображается линией похожей на гиперболу, выражаемую уравнением $Pv^\kappa = const$,

где κ - эмпирический коэффициент.

При незначительных изменениях давления, κ принимается равным:

- $\kappa = 1,3$ – для перегретого пара;

$\kappa = 1,135$ – для сухого насыщенного пара;
 $\kappa = 1,035 + 0,1x$ – для влажного пара.

В I,S - диаграмме - адиабата изображается линией 1-2 (рис. 2.2) Начальное состояние пара определяется $m.1$, находящейся на пересечении изобары P_1 и изотермы t_1 . Опуская из точки 1 - вертикальную линию $S = const$ до пересечения с изобарой P_2 , находим точку 2, которая определяет конечное состояние пара в конце адиабатного расширения. В точке 2 определяем степень сухости - x_2 .

Работа расширения в адиабатном процессе совершается за счет внутренней энергии:

$$l = -\Delta U = (i_1 - P_1 v_1) - (i_2 - P_2 v_2), \frac{\kappa ДЖ}{\kappa g}$$

Теплота процесса $q = 0$, т.к. процесс осуществляется без подвода (или отвода) теплоты.

Энтальпия процесса:

$$i_2 = i_2' + r \cdot x_2$$

Изохорный процесс ($v = const$) с подводом теплоты

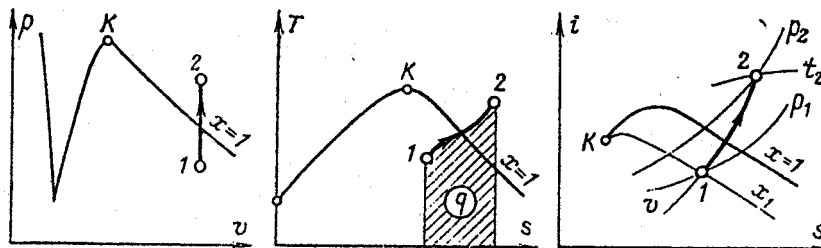


Рисунок 2.3 - Изохорный процесс для водяного пара.

В I,S - диаграмме изохора 1-2 в начальном состоянии определяется $m.1$, находящейся на пересечении заданной изохоры v с изобарой P_1 . (рис.2.3) Конечное состояние определяется $m. 2$ - на пересечении изохоры v с изотермой t_2 , так как $v = const$, то работа расширения не совершается $l = 0$, следовательно, вся теплота расходуется на изменение внутренней энергии:

$$q_v = \Delta U = (i_2 - P_2 v_2) - (i_1 - P_1 v_1),$$

где $v_2 = v_1$.

Изотермический процесс ($T = const$)

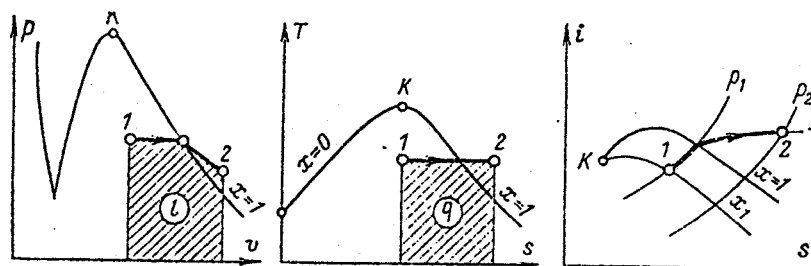


Рисунок 2.4 - Изотермический процесс для водяного пара

В I,S - диаграмме линия 1-2 является изотермой (рис.2.4) Начальное состояние пара $m.1$ находится на пересечении изобары P_1 и линии постоянной сухости x_1 , а конечное состояние в $m.2$ - на пересечении заданной изотермы t и изобары P_2 .

В процессе изотермического расширения пара часть подводимой теплоты расходуется на изменение его внутренней потенциальной энергии, а часть на работу расширения.

Количество подведенной теплоты

$$q = T (S_2 - S_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где T – абсолютная температура, выраженная $^{\circ}\text{K}$;

$S_{1,2}$ – энтропия соответственно начала и конца процесса.

Изменение внутренней энергии в процессе расширения пара

$$\Delta U = i_1 - i_2 = (i_2 - P_2 v_2) - (i_1 - P_1 v_1), \frac{\text{кДж}}{\text{кг}},$$

где P_1, P_2 – давление начала и конца процесса, Па ;

i_1, i_2 – энтальпия начала и конца процесса, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$;

v_2, v_1 – удельные объемы начала и конца процесса.

Работа расширения:

$$l = q - \Delta U, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Изобарный процесс ($P = \text{const}$) расширения (сжатия)

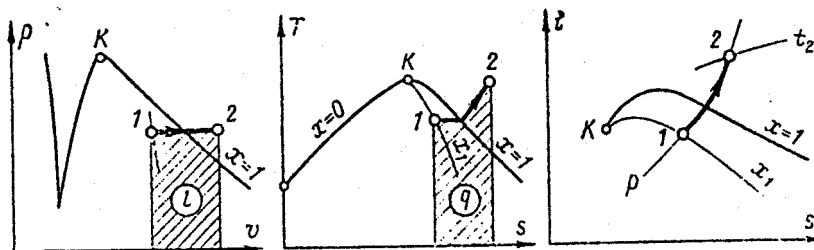


Рисунок 2.5 - Изобарный процесс для водяного пара.

В I,S - диаграмме линия 1-2 является изобарой (рис.2.5) В начальном состоянии $m.1$ находится на пересечении заданной изобары P и линии постоянной сухости x_1 , а конечное состояние $m.2$ - на пересечении изобары P и изотермы t_2 .

Количество подводимой теплоты при расширении считается

положительным, а отводимой теплоты при сжатии - отрицательным и определяется по формуле:

$$q = i_2 - i_1, \frac{\kappa \Delta \mathcal{E}}{\kappa \mathcal{E}},$$

Работа расширения (сжатия) идет на изменение объема

$$l = P (\nu_2 - \nu_1), \frac{\kappa \Delta \mathcal{E}}{\kappa \mathcal{E}}, \quad - \text{ при расширении положительно,}$$

- при сжатии отрицательно.

Изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = (i_2 - P_2 \nu_2) - (i_1 - P_1 \nu_1), \frac{\kappa \Delta \mathcal{E}}{\kappa \mathcal{E}}, \quad - \text{ при расширении положительно,}$$

- при сжатии отрицательно.

Задание

1) Изучить таблицы П5-П7 водяного пара (Приложение А) и i,s -диаграмму водяного пара для решения практических задач

2) Письменно ответить на вопросы для самопроверки знаний

Вопросы для самопроверки знаний

1. Дать определение влажного насыщенного пара.
2. Какой пар называется сухим насыщенным? Найти область сухого насыщенного пара на i,s -диаграмме
3. Какой пар называют перегретым? Найти область перегретого пара на i,s -диаграмму
4. Какой процесс называется парообразованием?
5. Какой процесс носит название конденсации пар?
6. Изобразить и охарактеризовать P, ν -диаграмму водяного пара.
7. Указать на I,S -диаграмме кривые степени сухости пара?
8. Какая линия называется верхней пограничной кривой?
9. Какая линия называется нижней пограничной кривой?
10. Какие величины определяются по таблицам водяного пар?
11. Каким образом определяется состояние водяного пара?
12. Охарактеризовать I,S -диаграмму водяного пара, какие кривые на ней находятся?
13. Какие параметры водяного пара определяются при помощи I,S -диаграммы?
14. Какие области водяного пара изображены на I,S -диаграмме?

Рекомендуемая литература:

Л[1, с.108; 2, с.179.]

Тема : *Истечение, дросселирование газов и паров (6ч.)*

Студент должен:

знать:

сущность процесса истечения газов и паров; определения кинетической энергии струи, скорости истечения; понятие о критической скорости и критическом давлении, располагаемой работе; сущность процесса дросселирования газов и паров и его практическое применение;

уметь:

изображать процессы изменения состояния водяного пара в PV и Ts-диаграммах; определять параметры и характеристики водяного пара при истечении и дросселировании по is-диаграмме; производить расчет скорости истечения.

Вопросы темы:

Истечение и дросселирование газов и паров. Кинетическая энергия струи и ее использование. Работа проталкивания и располагаемая работа. Скорость и критическая скорость истечения, секундный массовый расход газа. Критическое отношение давлений и критическая скорость. Зависимость истечения и расхода от соотношения давлений (2ч.)

Практическое применение истечения. Комбинированное сопло Лаваля. Располагаемый и действительный теплоперепад, потери в соплах. Коэффициенты скорости и расхода. КПД сопла, его влияние на скорость истечения, расход и параметры пара (2ч.)

Процесс дросселирования и его особенности. Дросселирование идеального газа и водяного пара. Изображение процессов дросселирования в IS –диаграмме. Эффект Джоуля-Томсона. Эффект адиабатного дросселирования реальных газов. Изменение температуры реальных газов и паров при дросселировании. Техническое применение дросселирования (2ч.)

Основные теоретические положения

Истечение газов и паров

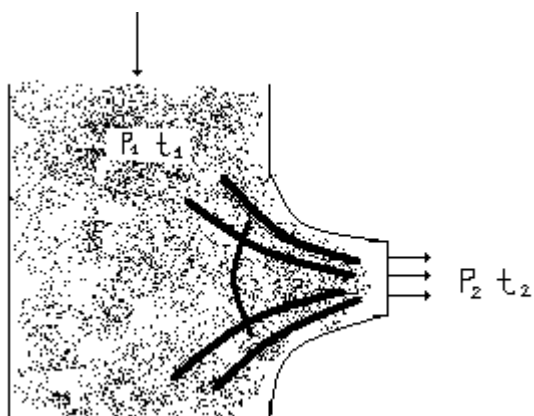
При решении задач, связанных с истечением газа через сопла (насадки), чаще всего приходится определять скорость истечения и расход, т.е. количество газа, вытекающего в единицу времени. В этих случаях

необходимо прежде всего найти

отношение $\frac{p_2}{p_1}$, где p_2 - давление среды

на выходе из сопла; p_1 - давление среды

на входе в сопло (рис.2.6)



Полученное числовое значение $\frac{p_2}{p_1}$ сравнивают с так называемым критическим отношением давлений для данного газа, определяемым из Рисунок 2.6 - Истечением газа через сопло.

равенства

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{KP} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

и равным:

для одноатомных газов при $k = 1,67$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{KP} = 0,487$$

для двухатомных газов при $k = 1,4$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{KP} = 0,528$$

для трех- и многоатомных газов при $k = 1,29$

$$\left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{KP} = 0,546$$

Если адиабатное истечение газа происходит при $\left(\frac{p_2}{p_1}\right) > \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{KP}$, то теоретическая скорость газа у устья суживающегося сопла определяется по формуле

$$C = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 u_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (2.1)$$

где k - показатель адиабаты;

u_1 - удельный объем газа на входе в сопло.

Заменяя для идеального газа в формуле $p_1 u_1$ на RT_1 , получаем

$$C = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}. \quad (2.2)$$

В формулах (2.1) и (2.2) значения p, u и R даны соответственно в следующих единицах $\text{н/м}^2, \text{кг/м}^3$ и дж/(кг*град) .

Теоретическая скорость газа может быть также найдена по формуле

$$C = \sqrt{2(i_1 - i_2)}, \quad (2.3)$$

где i_1 и i_2 - соответственно энтальпии газа в начальном и конечном состояниях в дж/кг .

Если значения i_1 выражены в дж/кг , то формула (2.3) принимает следующий вид:

$$C = \sqrt{2(i_1 - i_2) \cdot 1000} = 44,76\sqrt{i_1 - i_2}.$$

Если энтальпия газа измерена в ккал/кг , то формула (2.3) примет следующий вид:

$$C = \sqrt{2(i_1 - i_2) \cdot 1000 \cdot 4,1868} = 91,53\sqrt{i_1 - i_2}.$$

Во всех приведенных случаях скорость C получается в м/сек .

Расход газа определяется по формуле

$$M = f \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{p_2} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (2.4)$$

где f - выходное сечение сопла в м^2 .

Если же адиабатное истечение газа происходит при $\left(\frac{p_2}{p_1} \right) \leq \left(\frac{p_2}{p_1} \right)_{\text{кр}}$, то теоретическая скорость газа в устье суживающегося сопла будет равна критической скорости и определится по уравнению

$$C = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 u_1}. \quad (2.5)$$

Критическая скорость по формуле (2.5) зависит только от начального состояния газа и показателя адиабаты k . Поэтому, подставляя значение k для различных тел, получим более удобные формулы для определения критической скорости. В частности, для двухатомных газов

$$C_{\text{кр}} = 1,08\sqrt{p_1 u_1} \quad (2.6)$$

или

$$C_{\text{кр}} = 1,08\sqrt{RT_1} \quad (2.7)$$

Критическая скорость может быть также определена по одной из следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{кр}} &= \sqrt{2(i_1 - i_2)}; \\ C_{\text{кр}} &= 44,76\sqrt{i_1 - i_{\text{кр}}}; \\ C_{\text{кр}} &= 91,53\sqrt{i_1 - i_{\text{кр}}}; \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

где i - энтальпия газа при критическом давлении $p_{\text{кр}}$. В первой формуле энтальпия выражена в дж/кг , во второй - в кдж/кг и в третьей - в ккал/кг .

Расход газа в этом случае будет максимальным и может быть вычислен по уравнению

$$M_{\text{max}} = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{2}{k-1}} \frac{p_1}{u_1}}. \quad (2.9)$$

Подставляя в эту формулу значение k , получаем для двухатомных газов

$$M_{\max} = 0,686 f \sqrt{\frac{p_1}{u_1}} \quad (5.10)(2.10)$$

для трехатомных газов

$$M_{\max} = 0,667 f \sqrt{\frac{p_1}{u_1}} \quad (2.11)$$

Во всех перечисленных формулах следует брать p в н/м^2 а u – в $\text{м}^3/\text{кг}$. Расход газа получается в кг/сек .

Для получения скоростей истечения выше критических (сверх звуковые скорости) применяется расширяющееся сопло, или сопло Лавала (рис.2.7).

В минимальном сечении сопла Лавала скорость движения газа равна критической скорости или скорости звука, определяемой параметрами $p_{кр}$ и $u_{кр}$.

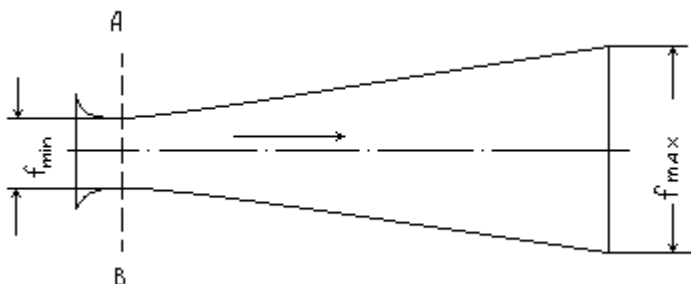


Рисунок 2.7 - Сопло Лавала

Площадь минимального сечения сопла определяется по формуле

$$f_{\min} = \frac{M_{\max} u_{кр}}{C_{кр}} M^2, \quad (2.12)$$

причем для двухатомных газов она может быть определена также по формуле

$$f_{\min} = \frac{M_{\max}}{0,686 \sqrt{\frac{p_1}{u_1}}} \quad (2.13)$$

а для трех атомных газов

$$f_{\min} = \frac{M_{\max}}{0,667 \sqrt{\frac{p_1}{u_1}}} \quad (2.14)$$

Площадь выходного сечения сопла

$$f_2 = f_{\min} \frac{c_{кр} u_2}{c u_{кр}}, \quad (2.15)$$

причем $u_2 = u_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}}$ – удельный объем газа при давлении среды p_2 .

Длина расширяющейся части сопла определяется по уравнению

$$l = \frac{d - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (2.16)$$

где d и d_{\min} - соответственно диаметры выходного и минимального сечений;
 α - угол конусности расширяющейся части сопла.

При истечении водяного пара все общие законы, установленные для истечения газов, остаются в силе. Однако формулы истечения для газов, в которые входит величина k , для водяного пара будут приближенными, так как значение k для пара в процессе изменения его состояния непостоянно.

В связи с этим при истечении водяного пара в для точных расчетов следует

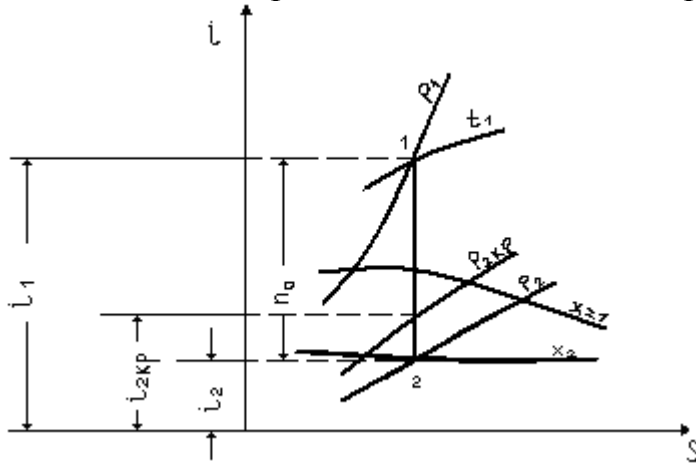


Рисунок 2.8 - Процесса истечения водяного пара в диаграмме is

применять следующие формулы:

при $\frac{p_2}{p_1} \geq \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$ для определения скорости – формулы (2.3), а для определения

расхода пара – формулу $M = \frac{f \rho}{u_2}$; (2.17)

при $\frac{p_2}{p_1} \leq \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{кр}$ для определения критической скорости следует применять

формулы (2.8), а для определения расхода – любую из следующих

$$\text{формулы: } \left. \begin{aligned} M_{\max} &= \frac{f \sqrt{2(i_1 - i_{кр})}}{u_{кр}} \\ M_{\max} &= \frac{44,76 f \sqrt{i_1 - i_{кр}}}{u_{кр}} \\ M_{\max} &= \frac{91,53 f \sqrt{i_1 - i_{кр}}}{u_{кр}} \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

В первой формуле i_1 и $i_{кр}$ выражены в дж/кг , во второй – в кдж/кг и в третьей – в ккал/кг .

Значения i_2 и $i_{кр}$, входящие в формулы для расчета процесса истечения водяного пара, легко определить по диаграмме is . Для этого нужно провести адиабату 1-2 до пересечения с линией i_2 или $i_{кр}$ (рис.2.8)

Площади поперечных сечений сопла определяются по формулам:

$$f_{\max} = \frac{M_{\max} u_{KP}}{C_{KP}}; \quad (2.19)$$

$$f = \frac{Mu_2}{c} \quad (2.20)$$

Длина расширяющейся части сопла определяется по формуле (2.16)

Дросселирование (мятие) газов и паров

При прохождении газа или пара через суженное сечение происходит снижение его давления. Этот процесс называют *дросселированием* или *мятием*.

В процессе дросселирования газа или пара наряду со снижением давления всегда возрастает удельный объем. Температура идеальных газов при дросселировании остается неизменной, температура же реальных газов остается постоянной лишь при одной определенной начальной температуре газа, называемой температурой инверсии; приближенное значение этой температуры определяется из выражения $T_{инв} \approx 6,75T_{кр}$, (2.21) где $T_{кр}$ - критическая температура газа или пара в $^{\circ}K$.

Если же температура подвергающегося дросселированию газа отлична от температуры инверсии, то его температура изменяется: уменьшается, если температура газа меньше температуры инверсии, и увеличивается, если температура его больше температуры инверсии.

С достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия газа или пара в начальном и конечном состояниях одинакова т.е

$$i_1 = i_2$$

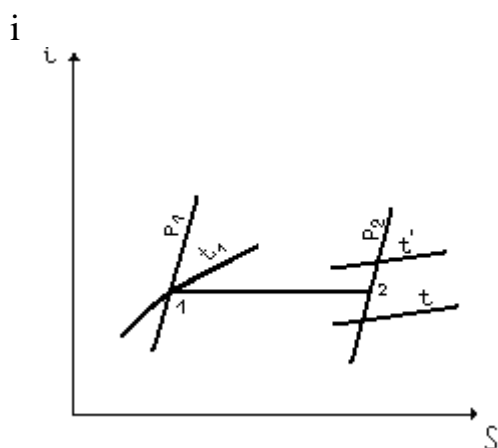


Рисунок 2.9 – Дросселирование пара

Дросселирование – процесс необратимый, поэтому он не может быть изображен в термодинамической диаграмме каким-либо графиком.

Задачи, связанные с дросселированием пара, обычно сводятся к определению параметров состояния пара после дросселирования. Проще всего

они решаются при помощи диаграммы is . Так как в начальном и конечном состояниях энтальпия пара одинакова, то конечное состояние пара определяется пересечением горизонтали, проходящей через начальную точку 1, с изобарной конечного давления p_2 . Точка 2 определяет все параметры после дросселирования.

Задание

1) Изучить тему: «Истечение, дросселирование газов и паров» по учебнику, выполнить краткий конспект и ответить на вопросы для самопроверки знаний.

Вопросы для самопроверки знаний

1. В чем заключается сущность процесса истечения газов и паров.
2. В чем заключается сущность процесса дросселирования газов и паров.
3. Какая скорость истечения газов и паров называется критической.
4. Что собой представляет сопло Лавалья.
5. Практическое применение сопла Лавалья.
6. Определение коэффициента полезного действия при истечении.
7. Что собой представляет дроссель, его практическое применение.

Рекомендуемая литература:

Л[1, с.121; 134; 2, с.224].

Тема: Циклы паротурбинных установок (4ч.)

Студент должен:

знать:

принципиальные схемы паротурбинных установок, работающих по циклу Ренкина, регенеративному циклу, циклу с промперегревом, теплофикационному и парогазовому циклам; способы определения термического КПД циклов и методы их повышения;

уметь:

изображать циклы паротурбинных установок в PV и Ts -диаграммах, производить расчет технико-экономических показателей паросиловых циклов с помощью is -диаграммы.

Вопросы темы:

Паротурбинные установки. Методы повышения термического КПД цикла Ренкина. Действительный цикл с необратимым адиабатным расширением пара в турбине. Влияние основных параметров пара на термический КПД паросилового цикла Ренкина. (2ч.)

Бинарный и парогазовый циклы паросиловых установок. Принципиальная схема цикла и изображение цикла в TS-диаграмме (2ч.)

Основные теоретические положения

Паротурбинная установка - энергетическая установка, включающая паровые котлы и паровые турбины.

Цикл Ренкина

Теоретическим циклом паротурбинных установок является цикл Ренкина.

При высоких начальных параметрах пара и глубоком вакууме термический КПД цикла Ренкина не превышает 45 – 47%.

Термический КПД цикла повышается при повышении начального давления пара P_1 и его температуры t_1 , причем влажность пара в конце адиабатного расширения должна оставаться в допустимых пределах, то есть не более 10 – 12%. Повышение начального давления пара с целью увеличения КПД цикла Ренкина приводит к увеличению влажности пара на выходе из двигателя. Это оказывает вредное влияние на работу паровых турбин.

Цикл с промежуточным (или повторным) перегревом пара

Цикл с промежуточным (или повторным) перегревом пара применяется в энергетике в том случае, когда при повышении давления пара свыше 10,0 МПа и глубоком вакууме в конденсаторе 0,005 - 0,0035 МПа температуре 540 - 580 °С уже не обеспечивают допустимой степени влажности пара. Применение вторичного перегрева не только уменьшает конечную влажность пара, но и позволяет повысить термический КПД цикла, если будут правильно выбраны промежуточное давление и конечная температура пара после промежуточного пароперегревателя.

При введении однократного перегрева термический КПД цикла повышается на 2 - 3 % в сравнении с термический КПД цикла Ренкина при одинаковых параметрах пара.

Регенеративный цикл

Эффективным способом повышения КПД паросиловых установок служит регенерация. Регенерация - означает возвращение части отходящего тепла для дальнейшего его использования в тепловой установке.

В схеме регенеративного цикла не весь пар, поступающий в турбину расширяется до конечного давления, а часть его отбирается при некотором промежуточном давлении и направляется в подогреватель, куда одновременно подается конденсат.

Термический КПД регенеративного цикла всегда больше термического КПД цикла Ренкина с теми же начальными и конечными параметрами на 10-12%. Экономический эффект растет с увеличением отборов пара.

Бинарный цикл

Помимо паротурбинных установок, существуют и гаотурбинные установки, рабочим телом в которых используются продукты горения разнообразных топлив. В таких турбинах начальные параметры выше, чем в паротурбинных установках. Однако газы могут расширяться только до атмосферного давления, а пар – до более низкого давления. А КПД увеличивается при повышении начальной температуры и понижении температуры на выходе. Поэтому стали использовать циклы комбинированных установок с двумя рабочими телами – такие циклы называются *бинарными*.

Задание

1) Изучить тему: «Паротурбинные установки» по учебнику, выполнить краткий конспект и ответить на вопросы для самопроверки знаний.

Вопросы для самопроверки знаний

1. Охарактеризовать теоретический цикл Карно.
2. Охарактеризовать цикл Ренкина.
3. Изобразить принципиальную схему паротурбинной установки.
4. Указать отличия теоретического цикла Карно от цикла Ренкина.
5. Построить P, V и T, S – диаграммы цикла Ренкина.

6. Охарактеризовать основные термодинамические процессы цикла Ренкина в P, V и T, S – диаграммах. Указать где происходят данные процессы на принципиальной схеме.

7. Как меняется состояние водяного пара в характерных точках цикла Ренкина, P, V -диаграммах?

8. С какой целью используют цикл с промежуточным перегревом пара?

9. Какой цикл паротурбинной установки называется регенеративным?

10. Чему равен термический КПД цикла Ренкина?

11. Каким образом можно увеличить КПД цикла Ренкина?

12. Какое давление соответствует перегретому пару в парогенераторе и паре в конденсаторе при глубоком вакууме?

13. Какая температура насыщения соответствует предельному давлению в конденсаторе, и какой при этом должна быть температура охлаждающей воды?

14. Указать допустимую конечную степень влажности пара на последних ступенях турбины.
15. Охарактеризовать теплофикационный цикл.
16. Охарактеризовать бинарный цикл.

Рекомендуемая литература:

Л[1 с.138]

Тема: Конвективный теплообмен (2ч.)

Студент должен:

знать:

основные положения конвективного теплообмена; основы теории подобия, физический смысл констант подобия; основные критериальные уравнения;

уметь:

применять критериальные уравнения при решении практических задач.

Вопросы темы:

Понятие о теплопередаче. Константы подобия, их физический смысл .
Основные положения о теории подобия. Понятие о гидродинамическом и тепловом пограничном слое.

Основные теоретические положения

Теплота передается тремя способами: теплопроводностью, конвекцией и излучением.

Теплопередачей – называют теплообмен между двумя теплоносителями через разделяющую их твердую стенку.

Процесс теплопередачи включает в себя процесс теплоотдачи от горячего теплоносителя к поверхности твердой стенки, процесс теплопроводности через твердую стенку и процесс теплоотдачи от поверхности твердой стенки к холодному теплоносителю.

Теплоотдачей – называется теплообмен между жидкостью и соприкасающейся с ней поверхностью твердой стенки.

Теплопроводность – это процесс распространения тепловой энергии при непосредственном соприкосновении отдельных частей тела, имеющих различные температуры.

Конвекция – это процесс переноса энергии при перемещении объемов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область, имеющую другую температуру.

Излучение (лучистый теплообмен – это процесс передачи энергии электромагнитными волнами.

Таблица 2.1-Критериальные константы, используемые в теории подобия

Формула	Название критерия	Величины входящие в критерий	Значение критерия
$Re = wd / \nu$	Критерий Рейнольдса (критерий режима движения)	W- Скорость, м / сек; d – Эквивалентный диаметр канала V – Коэффициент кинематической вязкости, м ² / сек	Характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет гидродинамический режим движения
$Eu = \Delta p / w^2 \rho$	Критерий Эйлера (критерий падения давления)	Δp - перепад давления. н / м ² ρ – плотность жидкости, кг / м ³	Характеризует соотношение сил давления и сил инерции, а также безразмерную величину падения давления
$= \nu / a$	Критерий Прандтля (критерий физических свойств жидкости)	A – коэффициент температуропроводности , м ² / сек	Характеризует физические свойства жидкости и способность распространения тепла в жидкости

продолжение таблицы 2.1

$Pe = Re \cdot Pr$	Критерий Пекла	Re - критерий Рейнольдса Pr - критерий Прандтля	Является мерой отношения молекулярного и конвективного переноса тепла в потоке
$Nu = ad / \lambda$	Критерий Нуссельта (критерий теплоотдачи)	L – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт / (м * град) λ - коэффициент теплопроводности жидкости (газа) Вт / (м * град) L – Характерный размер тела, м	Характеризует отношение между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока Является мерой соотношения между внутренним и внешним термическим сопротивлением
$Bi = aL / \lambda_m$	Критерий Био	λ_m - коэффициент теплопроводности твердого тела (материала), Вт / (м * град)	
$Fo = at / L^2$	Критерий Фурье (безразмерное время)	t – время, сек	Характеризует связь между скоростью изменения температурного поля, физическими константами и размерами тела.
$Gr = \beta g L^3 \Delta t / \nu^2$	Критерий Грасгофа (критерий подъёмной силы)	β – коэффициент объемного расширения 1 / град	Характеризует подъёмную силу, возникающую в жидкости.

Задание

1) Изучить тему: «Конвективный теплообмен» по учебнику, выучить константы подобия в таблице 2.1, выполнить краткий конспект и ответить на вопросы для самопроверки знаний.

Вопросы для самопроверки знаний

1. Дать определение гидродинамического пограничного слоя.
2. Дать определение теплового пограничного слоя.

3. Какому значению соответствует критическое число Рейнольдса при движении жидкости по трубам?
4. Дать определение критическому числу Рейнольдса.
5. Охарактеризовать критерий Рейнольдса и величины входящие в него.
6. Охарактеризовать критерий Нуссельта и величины входящие в него.
7. Какое движение жидкости называется ламинарным.
8. Какое движение жидкости называется турбулентным.
9. Охарактеризовать критерий Прандтля и величины входящие в него.

Тема: Теплообмен и теплоотдача при конденсации и кипении (6ч.)

Студент должен:

знать:

особенности теплоотдачи при конденсации; условия возникновения конденсации; понятия о пленочной и капельной конденсации; факторы, влияющие на теплоотдачу при конденсации пара; особенности теплоотдачи при кипении; условия возникновения кипения; понятие о пузырьчатом и пленочном режимах кипения; факторы, влияющие на теплоотдачу при кипении.

уметь:

применять критериальные уравнения при решении практических задач.

Вопросы темы:

Теплоотдача при конденсации . Условия возникновения конденсации. Понятие о пленочной и капельной конденсации. Факторы влияющие на теплоотдачу при конденсации пара. Определение коэффициента теплоотдачи при конденсации. (2ч.)

Условия возникновения кипения.

Пузырчатый и пленочный режимы кипения. Зависимость коэффициента теплоотдачи от давления, физических свойств жидкости, состояния поверхности и других факторов при пузырьчатом кипении . Зависимость коэффициента теплоотдачи при кипении от условий отвода пара, формы, размера и материала поверхности нагрева. Процесс кипения жидкости в трубе. Зависимость теплоотдачи от паросодержания жидкости. (4ч.)

Основные теоретические положения

Теплоотдача при конденсации пара

Конденсация пара представляет собой поверхностное явление: чистый пар, соприкасаясь со стенкой, температура которой ниже температуры насыщения, конденсируется, и конденсат (жидкость) оседает на поверхности стенки.

Различают *капельную* и *пленочную конденсации*.

Если водяной пар и металлическая поверхность чистые, то происходит *пленочная конденсация*.

При загрязненной поверхности происходит *капельная конденсация*.

На теплоотдачу при конденсации влияют следующие факторы: величина перегрева пара, содержание воздуха в паре и расположение труб в пучках.

Перегрев пара. Процесс конденсации перегретого пара происходит так же, как и насыщенного.

В конденсаторах паровых турбин конденсация осуществляется на пакетах горизонтально расположенных трубок, через которую пропускают холодную воду. Абсолютное давление в конденсаторах турбин составляет 2-5 Па, что вызывает проникновение туда воздуха из атмосферы. *Примесь воздуха к пару* сильно ухудшает теплоотдачу и массопередачу, так как неконденсирующийся газ остается у поверхности охлаждения и затрудняет доступ пара к поверхности. Поэтому на практике из конденсаторов удаляют воздух, что улучшает их работу.

Расположение труб в горизонтальных пучках влияет на толщину пленки конденсата на нижних рядах труб.

Теплоотдача при кипении жидкости

Теплообмен при кипении воды является важнейшим процессом, протекающим в парогенераторах и атомных реакторов, и по своей физической сущности отличается большой сложностью.

Возникновение процесса кипения возможно только при наличии в жидкости центров парообразования, которыми являются взвешенные частички и неровности поверхности нагрева, а также адсорбированные на поверхности нагрева газы.

При испарении жидкости в полости пузыря объем их увеличивается и пузыри, достигнув определенного размера, отрываются от стенки. При отрыве часть пара остается на стенке, что облегчает образование новых пузырей. Если жидкость во всем объеме оказывается перегретой, то при свободном движении пузырей их объем увеличивается. Если наоборот, жидкость недогрета до температуры насыщения, то пузыри конденсируются и кипение будет лишь у поверхности нагрева (*поверхностное кипение*)

Интенсивность теплоотдачи при пузырьковом кипении велика и коэффициенты теплоотдачи намного выше, чем в жидкости, нагрев которой происходит без кипения. При очень больших тепловых нагрузках количество образующихся паровых пузырьков может быть так велико, что у поверхности образуется сплошная паровая пленка, что создает пленочный режим кипения, при котором теплоотдача резко уменьшается, а температура стенки увеличивается. В практических условиях пленочный режим кипения является крайне нежелательным, и поэтому в большинстве случаев применяют пузырьковый режим кипения.

Коэффициент теплоотдачи при достижении пленочного кипения резко падает, так как паровая пленка у поверхности нагрева действует как

изоляционный материал. Устойчивое пузырьчатое кипение происходит при температурных напорах от 5 до 30 градусов, в то время как устойчивое пленочное кипение – от 100 до 1000 градусов.

Задание

1) Изучить тему: «Теплообмен и теплоотдача при конденсации и кипении» по учебнику, выполнить краткий конспект и ответить на вопросы для самопроверки знаний.

Вопросы для самопроверки знаний

1. Перечислить факторы влияющие на теплоотдачу при конденсации пара.
2. Какая конденсация называется пленочной , и при какой температуре она происходит.
3. Какая конденсация называется капельной , и при какой температуре она происходит.
4. От каких факторов зависит коэффициента теплоотдачи при пузырьчатом кипении.
5. Каким образом влияет паросодержание жидкости на теплоотдачу
6. Охарактеризовать условия возникновения конденсации.
7. Перечислить факторы влияющие на теплоотдачу при кипении жидкости.

Рекомендуемая литература:

Л[1, с.298; 5, с.172]

Тема 9: Теплообмен излучением. Основные понятия и законы (2ч.)

Студент должен:

знать:

природу теплового излучения и его основные характеристики; основные законы теплового излучения; излучательную и поглощательную способность тела;

уметь:

расчитывать количество лучистой энергии, степени черноты поверхности тел, излучательной и поглощательной способности тел.

Вопросы темы:

Основные законы теплового излучения и его свойства. Закон Кирхгофа, Стефана-Больцмана. Излучаемая способность тела, коэффициент излучения, коэффициент термического сопротивления, количество теплоты передаваемое при излучении, потока излучения, излучение газов и паров. Поглощательная, отражательная и пропускная способность тел. Различные случаи теплообмена излучением. Теплообмен излучением между двумя параллельными поверхностями. Теплообмен излучением при произвольном расположении

поверхностей. Особенности излучения газов и паров. Излучение и поглощение многоатомных газов.

Основные теоретические положения

Теплообмен излучением представляет собой такой вид теплообмена, при котором энергия переносится при помощи электромагнитных волн (или фотонов).

Источниками электромагнитных волн являются атомы и молекулы вещества.

Лучистая энергия излучается и поглощается материальными телами не непрерывно, а отдельными порциями - квантами или фотонами.

Испускаемый фотон представляет собой частицу, всегда движущуюся со скоростью света, обладающую энергией, импульсом и массой.

Тепловое излучение - это излучение определяемое только температурой тела и его оптическими свойствами. Различные тела обладают различной излучательной способностью. Излучательная способность E определяется количеством лучистой энергии Q излучаемой при данной температуре единицы поверхности тела в единицу времени для всех длин волн от $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$.

$$E = \frac{Q}{F\tau},$$

где F - площадь излучаемой поверхности, m^2 ;

τ - время излучения, секунд.

Из всего количества лучистой энергии Q , попавши на поверхность тела, часть ее Q_A поглощается телом, часть Q_R отражается от него, а часть Q_D - пропускается сквозь тела, т. е.

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D.$$

$\frac{Q_A}{Q} = A$ - коэффициент поглощения или поглощательная способность тела;

$\frac{Q_R}{Q} = R$ - коэффициент отражения или отражательная способность тела;

$\frac{Q_D}{Q} = D$ - коэффициент пропускания или пропускная способность тела.

Равенство $A + R + D = 1$ - называется уравнением теплового баланса.

Если $A = 1$ (т. е. $R = D = 0$), то тело поглощает все падающее на него излучение, ничего не отражая и не пропуская. Такое тело называется абсолютно черным.

Если $R = 1$ (т. е. $A = D = 0$), то тело отражает всю лучистую энергию. При этом если угол падения равен углу отражения - поверхность называют зеркальной. Если же энергия отражается по всем направлениям, т. е. отражение диффузное, то поверхность тела называют абсолютно белой.

Если $D=1$ (т. е. $A=R=0$), то тело пропускает все падающее излучение и называется абсолютно прозрачным.

Основные законы теплового излучения

Закон Кирхгофа. Отношение излучательной способности тела к его поглощательной способности не зависит от природы тела, а является одинаковой для всех тел функцией температуры и равно излучательной способности абсолютно черного тела при этой же температуре:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = \frac{E_0}{A_0} = E_0(T),$$

где $E_0(T)$ - излучательная способность абсолютно черного тела.

Закон Стефана - Больцмана. Излучательная способность абсолютно черного тела прямо пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$E_0 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

где $C_0 = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коэффициент излучения абсолютно черного тела.

Если в лучистом теплообмене участвуют две параллельные стенки с поверхностью F_l и температурами T_1 и T_2 , то полное количество лучистой теплоты Q_l переданное поверхностью 1 к поверхности 2 ($T_1 > T_2$) за время τ подсчитывают по формуле:

$$Q_l = F_l \tau C_{np} \left[\left(\frac{T_1}{100} - \frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

где C_{np} - приведенный коэффициент излучения системы тел параллельных поверхностей, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}^4}$,

$$C_{np} = \frac{C_0}{\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} - 1},$$

где E_1, E_2 и C_0 - коэффициенты излучения первого, второго и абсолютно черного тел.

Задание

- 1) Изучить тему по учебнику, выполнить краткий конспект.
- 2) Письменно ответить на вопросы для самопроверки знаний

Вопросы для самопроверки знаний

1. Что представляет собой теплообмен излучением?
2. Что является источником электромагнитных волн?
3. Что представляет собой фотон?
4. Каким образом осуществляется излучение и поглощение лучистой энергии.
5. Перечислить основные виды электромагнитного излучения.
6. Какие тела обладают непрерывным спектром излучения, какие прерывистым.
7. При каких температурах осуществляется теплообмен излучением.
8. Сформулировать закон Кирхгофа.
9. Сформулировать закон Стефана-Больцмана.
10. Указать уравнения теплового баланса.
11. Какие тела называют абсолютно черными, белыми и прозрачными?
12. Какой процесс называется теплопередачей?
13. Какими способами передается теплота. Охарактеризовать их.

Рекомендуемая литература:

Л[1, с.170; 3, с.142].

Тема: Теплообменные аппараты (2ч.)

Студент должен:

знать:

назначение, классификацию, принцип действия теплообменных аппаратов; основные схемы движения теплоносителей; основные способы теплообмена в теплообменных аппаратах; влияние на теплообмен в теплообменных аппаратах различных факторов;

уметь:

составлять уравнение теплового баланса и теплопередачи в теплообменных аппаратах; рассчитывать средний температурный напор, площадь поверхности теплообменного аппарата, конечные температуры теплоносителей; определять коэффициент теплопередачи при различных формах поверхности теплообмена.

Вопросы темы:

Назначение и классификация теплообменных аппаратов. Принцип работы поверхностных и смешивающих теплообменных аппаратов. Основные схемы движения теплоносителей.

Уравнение теплового баланса и теплопередачи в теплообменном аппарате. Коэффициент теплопередачи теплообменного аппарата при различных формах поверхности теплообмена. Влияние на теплообмен загрязнения поверхности нагрева.

Расчет теплообменника. Интенсификация процессов теплообмена в теплообменниках. Тепловая защита теплообменных аппаратов.

Основные теоретические положения

К теплообменным аппаратам относят все аппараты, которых осуществляется обмен теплом между греющей и нагреваемой средами.

По принципу передачи теплоты теплообменники делятся на *контактные* и *поверхностные*. Поверхностные в свою очередь делятся на *регенеративные* и *рекуперативные*.

В *поверхностных теплообменниках* греющая среда отделена от нагреваемой поверхностью и тепло в них передается через стенку. К ним относятся теплообменники, в которых тепло горячих дымовых газов передается через поверхность нагрева воде или пару, воздухоподогреватели, в которых тепло от газов передается воздуху; водяные и пароводяные подогреватели; поверхностные конденсаторы; отопительные радиаторы.

Применяют теплообменники без разделительной стенки. К ним в частности, относятся смесительные и регенеративные устройства.

Смесительные теплообменники, называемые также *контактными*, получили широкое распространение для использования тепла чистых продуктов сгорания, выходящих из котельных агрегатов. В смесительных теплообменниках тепло передается от пара или газа к воде при их смешивании.

Регенеративные теплообменники – это теплообменники периодического действия. В регенеративных теплообменниках тепло горячих газов сначала аккумулируется в теплоемкой насадке, например, в керамической сыпучей массе, а затем передается нагреваемой среде (например, воздуху) путем ее продувания через горячую насадку. Примером такого теплообменника служит регенеративный воздухоподогреватель, в котором в верхней камере непрерывно движущаяся насадка нагревается теплом топочных газов, а в нижней она охлаждается воздухом, который нагревается до необходимой температуры.

Наиболее распространены рекуперативные теплообменные аппараты; в них два жидких теплоносителя текут, разделенные твердой стенкой. Между теплоносителями происходит процесс теплопередачи.

Задание

- 1) Изучить тему по учебнику, выполнить краткий конспект.
- 2) Письменно ответить на вопросы для самопроверки знаний

Вопросы для самопроверки знаний

1. Какие аппараты называют теплообменниками.
2. Как делятся теплообменники по принципу передачи теплоты.
3. Привести примеры теплообменников, используемых на ТЭС.

4. Описать принцип работы рекуперативного и регенеративного воздухоподогревателей.
5. Описать принцип работы экономайзера.
6. Охарактеризовать схемы течения теплоносителей.
7. Основные задачи при расчете теплообменников.
8. Как влияет на теплообмен загрязнение поверхностей нагрева.
9. Каким образом осуществляется интенсификация процессов теплообмена в теплообменниках.
10. Каким образом осуществляется тепловая защита теплообменных аппаратов.

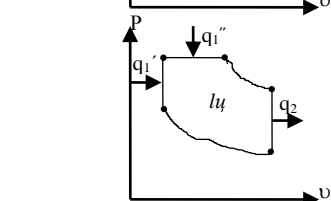
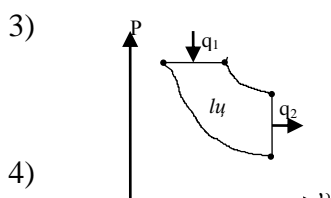
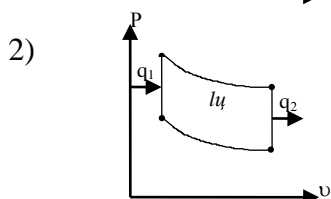
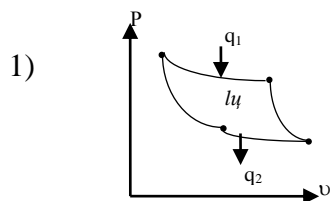
Рекомендуемая литература:

Л[1, с. 328 ; 5, с.199]

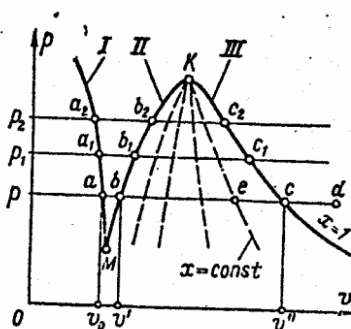
Тестовые задания для самопроверки знаний по темам 1-9

Вариант 1

1. Какая из диаграмм принадлежит циклу ДВС с подводом теплоты при постоянном давлении:

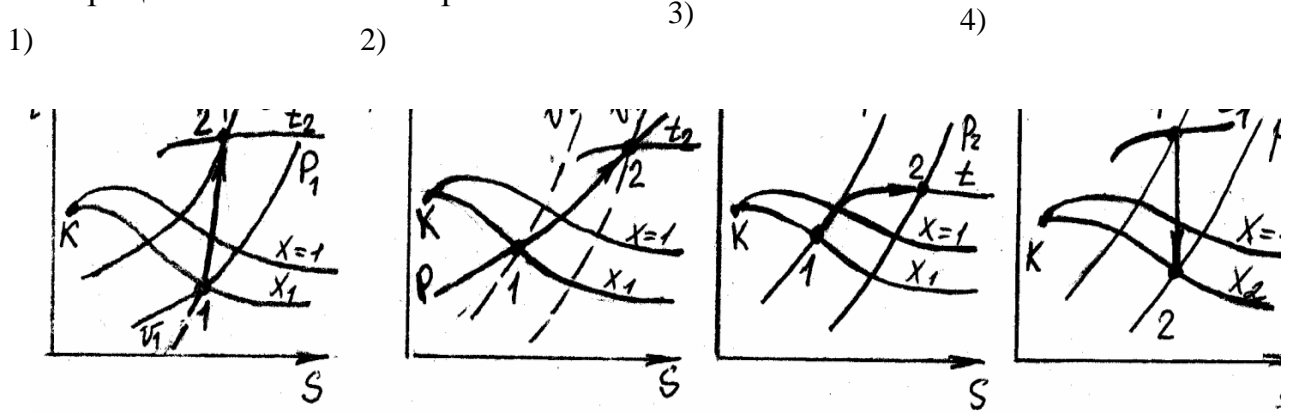


2. Какая линия в Pv – диаграмме водяного пара соответствует состоянию перегретого пара:

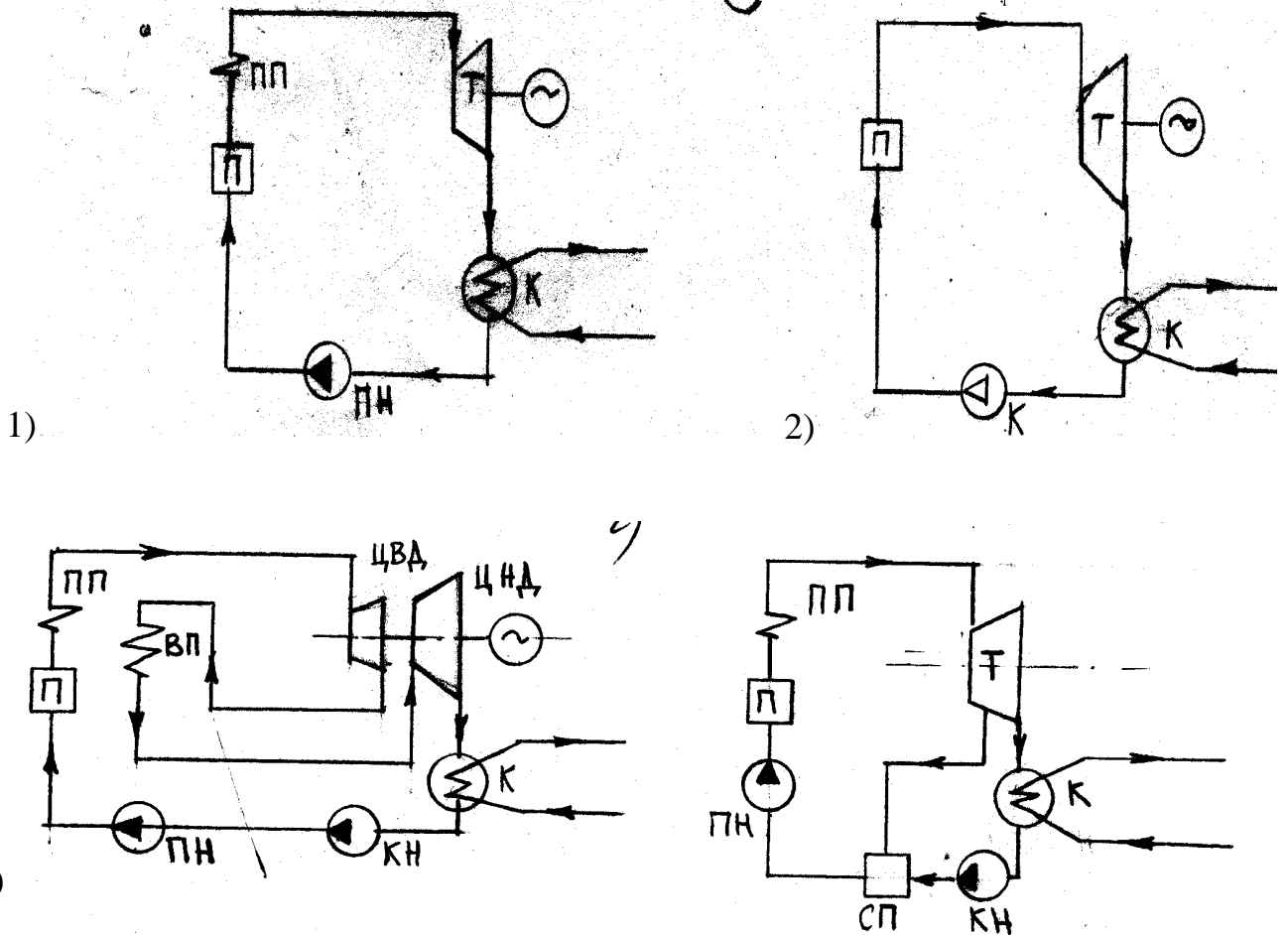


1.
 1) кс;
 2) мк;
 3) ке;
 4) сd.

3. Определить по i, S - диаграмме водяного пара, какой термодинамический процесс является изохорным:



4. Указать какая схема паротурбинной установки является принципиальной схемой цикла Ренкина:



5. Какой теплообменный аппарат называют регенеративным:

- 1) аппарат, в котором одна и та же поверхность нагрева (или охлаждения) поочередно омывается то горячим, то холодным теплоносителем через определенные промежутки времени;
- 2) аппарат, в котором теплота от греющего теплоносителя передается к нагреваемому через разделительную стенку;
- 3) аппарат, в котором теплообмен осуществляется при непосредственном соприкосновении и смешивании горячей и холодной теплоносителей;
- 4) аппарат, внутри которого непосредственно протекает какой-либо технологический процесс с выделением теплоты, для охлаждения которого применяют только один теплоноситель, забирающий теплоту от стенок аппарата.

6. Какое оборудование не относится к теплообменному аппарату:

- 5) деаэрактор;
- 6) турбина;
- 7) конденсатор;
- 8) пароперегреватель.

7. Какое вещество обладает максимальной теплопроводностью:

- 9) воздух;
- 10) кирпич;
- 11) пластмасса;
- 12) металл.

8. Указать выражение, определяющее критерий Рейнольдса:

- 1) $P_r = \frac{\nu}{a}$;
- 2) $P_e = \frac{\omega d}{a}$;
- 3) $R_e = \frac{\omega d}{\nu}$;
- 4) $N_U = \frac{\alpha d}{\lambda}$.

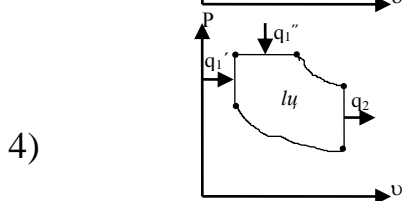
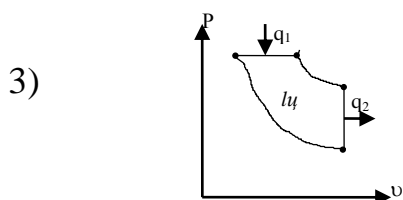
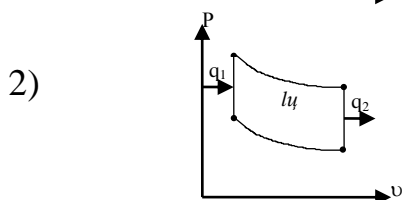
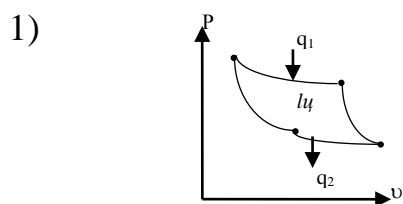
9. Какой критерий характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет гидродинамический режим движения:

- 1) Нуссельта;
- 2) Пекле;
- 3) Рейнольдса;
- 4) Прандтля.

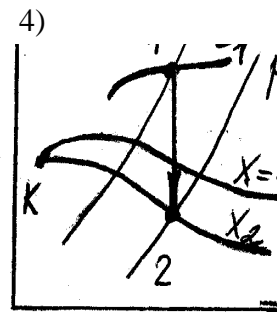
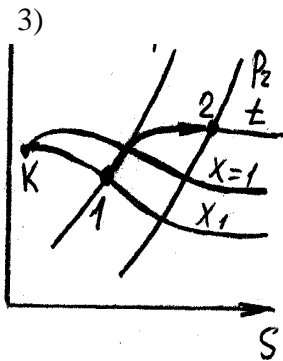
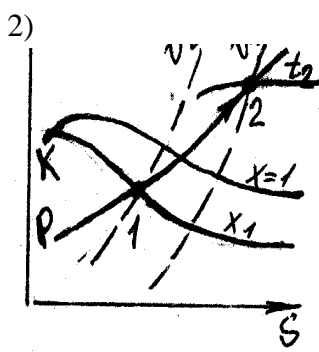
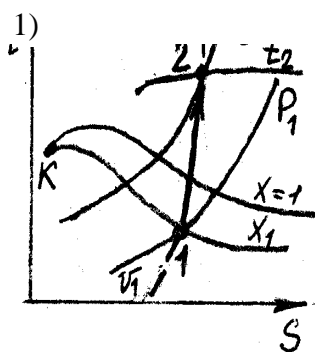
10. Распределение скоростей по поперечному сечению трубопровода при ламинарном режиме движения жидкости осуществляется по закону:
- 1) гиперболой;
 - 2) трапеции;
 - 3) прямой;
 - 4) параболы.
11. Область, расположенная вблизи поверхности тела, в которой скорость жидкости меняется от 0 до некоторого значения ω_0 на расстоянии δ от поверхности называется:
- 1) прилипшим слоем;
 - 2) тепловым пограничным слоем;
 - 3) пристенным слоем;
 - 4) гидродинамическим пограничным слоем.
12. При каком температурном напоре Δt происходит устойчивое плёночное кипение?
- 1) $5 - 30^{\circ}\text{C}$;
 - 2) $100 - 1000^{\circ}\text{C}$;
 - 3) $200 - 500^{\circ}\text{C}$;
 - 4) $100 - 200^{\circ}\text{C}$.
13. Наличие какого фактора не оказывает влияния на ухудшение теплоотдачи в конденсаторе:
- 1) расположение труб в пучках;
 - 2) наличие вакуума;
 - 3) температура окружающего воздуха;
 - 4) наличие воздуха в паре.

Вариант 2

1. Какая из диаграмм принадлежит циклу ДВС со смешанным подводом теплоты:

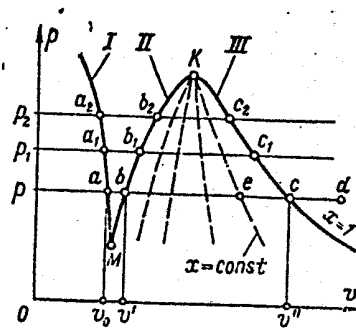


2. Определить по i, S - диаграмме водяного пара, какой термодинамический процесс является изобарным:



1.

3. Какая линия в Pv – диаграмме водяного пара соответствует состоянию кипящей жидкости:



1.

- 1) a_1M ;
- 2) mk ;
- 3) kc ;
- 4) ac .

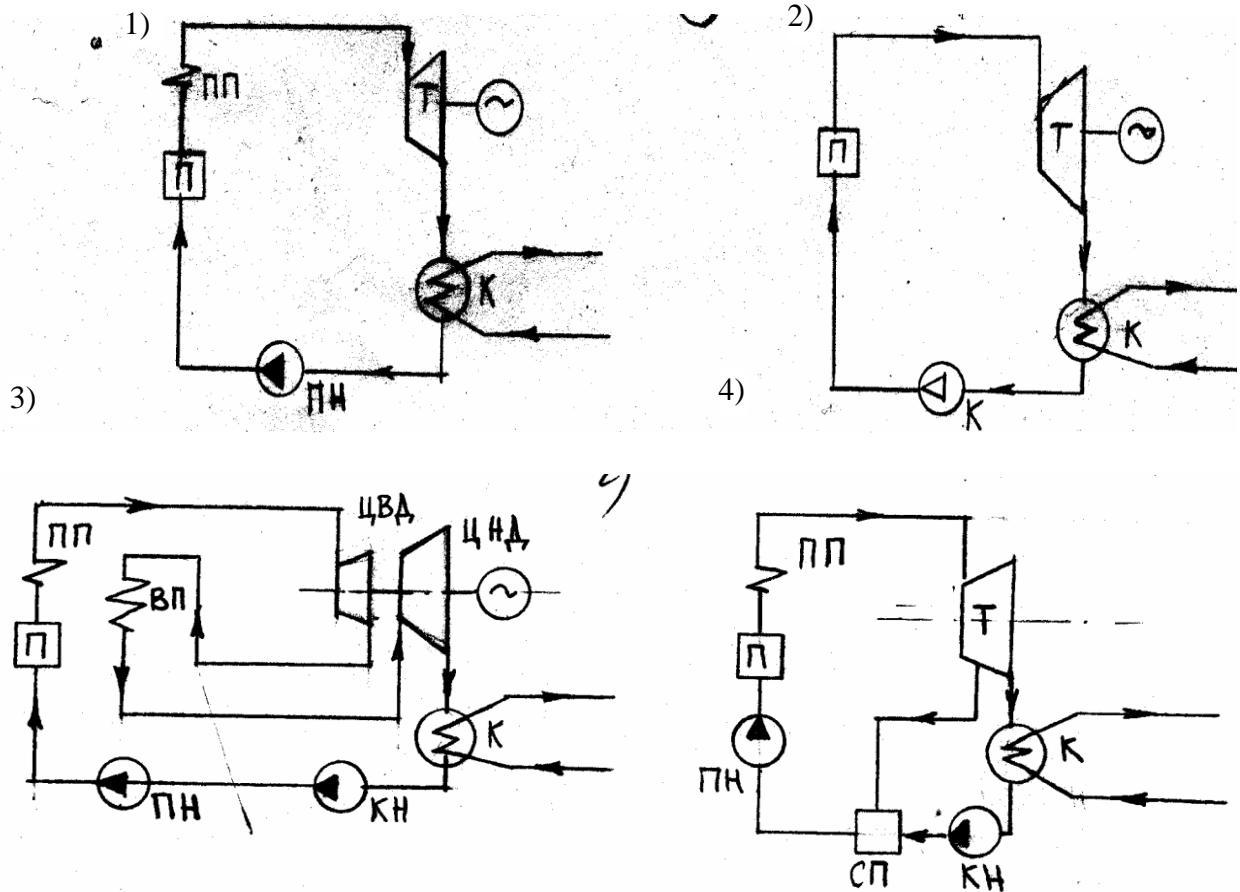
4. Какой вид теплообмена называется конвективным:

- 1) вид теплообмена, когда носителями теплоты являются микрочастицы вещества (молекулы), которые посредством теплового движения перемещаются из области с более высокой температурой в области с более низкой температурой;
- 2) теплообмен, который обусловлен совместным действием двух механизмов переноса теплоты: теплопроводностью и конвективным переносом, который осуществляется за счет движения самой среды из области высокой температуры в область низкой температуры;
- 3) вид теплообмена связанный с переносом энергии фотонов или электромагнитных волн.

5. Какое оборудование не относится к теплообменному аппарату:

- 13) деаэратор;
- 14) турбина;
- 15) конденсатор;
- 16) пароперегреватель.

6. Указать какая схема паротурбинной установки является принципиальной схемой цикла Карно:



7. Какой теплообменный аппарат называется аппаратом с внутренним тепловыделением:

- 1) аппарат, в котором одна и та же поверхность нагрева (или охлаждения) поочередно омывается то горячим, то холодным теплоносителем через определенные промежутки времени;
- 2) аппарат, в котором теплота от греющего теплоносителя передается к нагреваемому через разделительную стенку;
- 3) аппарат, в котором теплообмен осуществляется при непосредственном соприкосновении и смешивании горячей и холодной теплоносителей;
- 4) аппарат, внутри которого непосредственно протекает какой-либо технологический процесс с выделением теплоты, для охлаждения которого применяют только один теплоноситель, забирающий теплоту от стенок аппарата.

8. Указать выражение определяющее критерий Прандтля:

$$1) P_e = \frac{\omega d}{a};$$

$$2) P_r = \frac{\nu}{a};$$

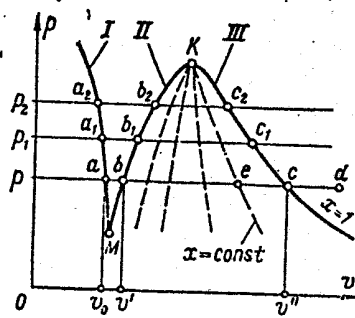
$$3) R_e = \frac{\omega d}{\nu};$$

$$4) N_U = \frac{\alpha d}{\lambda}.$$

9. Какой критерий является мерой отношения молекулярного и конвективного переноса тепла в потоке:
- 1) Нуссельта;
 - 2) Пекле;
 - 3) Рейнольдса;
 - 4) Прандтля.
10. Движение, при котором струйки жидкости движутся прямолинейно без пульсации скорости и давления называется:
- 1) равномерным;
 - 2) турбулентным;
 - 3) ламинарным;
 - 4) напорным.
11. Турбулентному режиму движения жидкости соответствует число Рейнольдса:
- 1) $R_e = R_{KP}$;
 - 2) $R_e > R_{KP}$;
 - 3) $R_e < R_{eKP}$;
 - 4) $R_e = \frac{\omega d}{\nu}$.
12. При каком температурном напоре Δt происходит устойчивое пузырьчатое кипение?
- 1) $5 - 30^{\circ}C$;
 - 2) $100 - 1000^{\circ}C$;
 - 3) $200 - 500^{\circ}C$;
13. Наличие какого фактора не оказывает влияния на ухудшение теплоотдачи в конденсаторе:
- 1) расположение труб в пучках;
 - 2) наличие вакуума;
 - 3) температура окружающего воздуха;
 - 4) наличие воздуха в паре.

Вариант 3

1. Какая линия в Pv -диаграмме водяного пара соответствует состоянию сухого насыщенного пара:

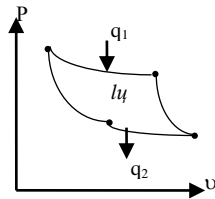


1.

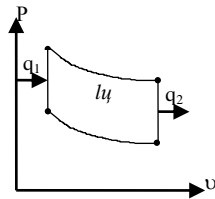
- 5) a_1M ;
- 6) MK ;
- 7) Kc ;
- 8) kl .

2. Какая из диаграмм принадлежит циклу ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме:

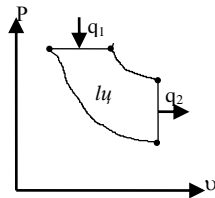
1)



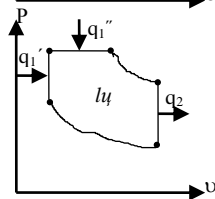
2)



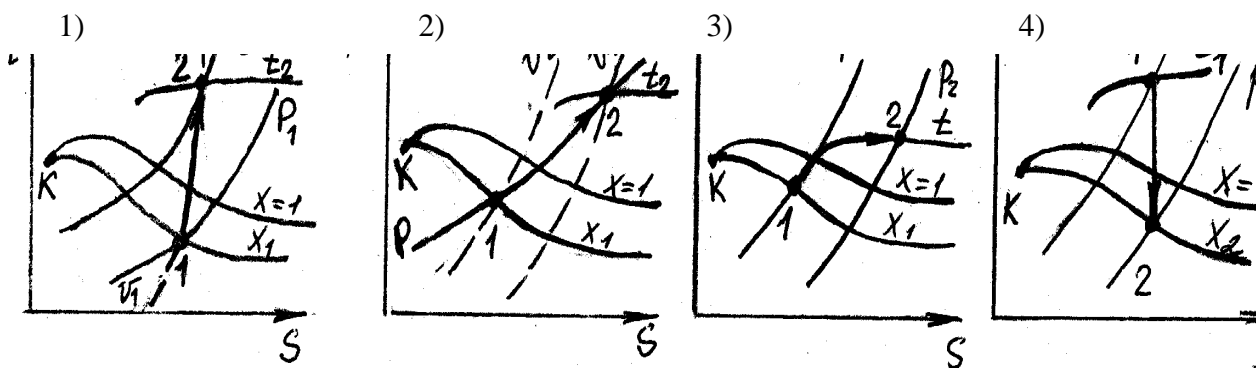
3)



4)

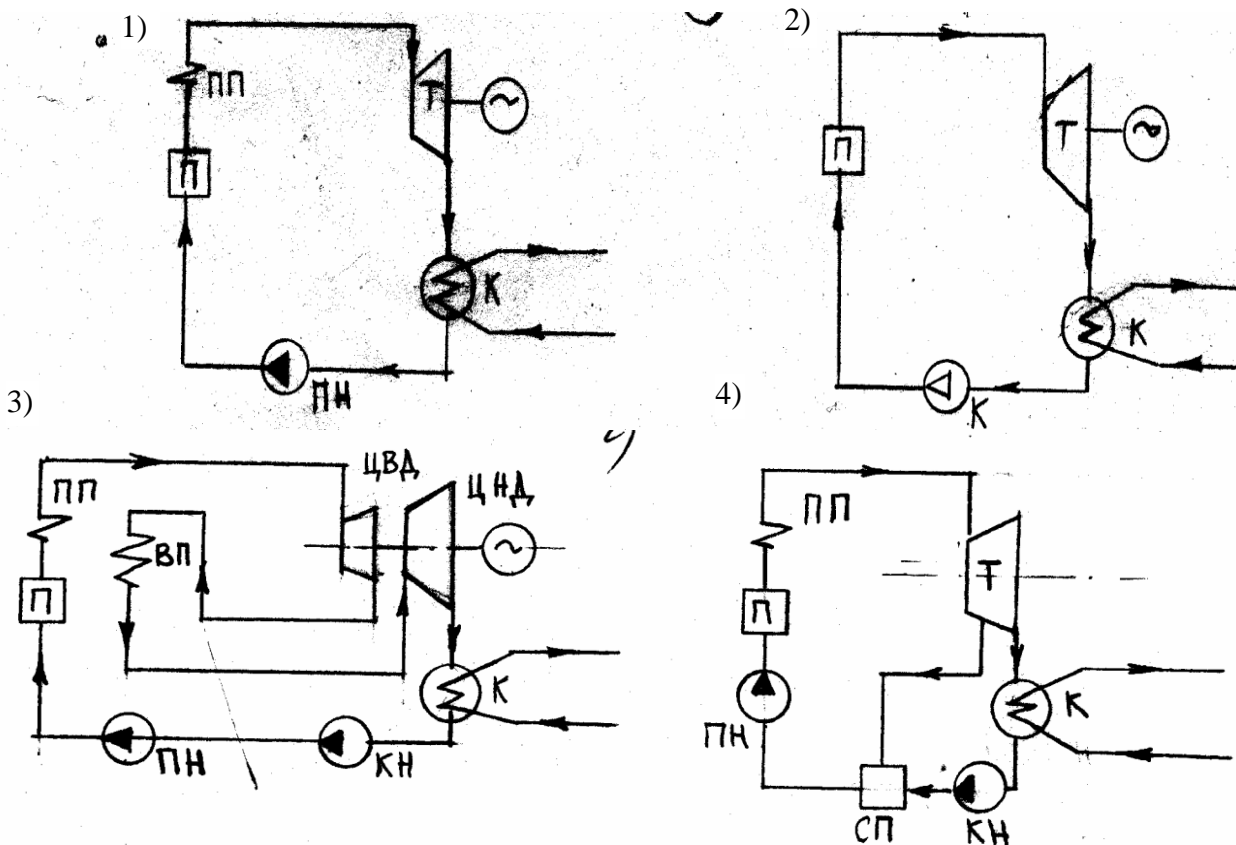


3. Определить по i, S - диаграмме водяного пара, какой термодинамический процесс является изотермическим:



1.

4. Указать какая схема паротурбинной установки является принципиальной схемой цикла с промежуточным перегревом пара:



5. Какой теплообменный аппарат называют рекуперативным:

- 1) аппарат, в котором одна и та же поверхность нагрева (или охлаждения) поочередно омывается то горячим, то холодным теплоносителем через определенные промежутки времени;
- 2) аппарат, в котором теплота от греющего теплоносителя передается к нагреваемому через разделительную стенку;

- 3) аппарат, в котором теплообмен осуществляется при непосредственном соприкосновении и смешивании горячей и холодной теплоносителей;
- 4) аппарат, внутри которого непосредственно протекает какой-либо технологический процесс с выделением теплоты, для охлаждения которого применяют только один теплоноситель, забирающий теплоту от стенок аппарата.

6. Какой вид теплообмена называется теплообменом излучения:

- 1) вид теплообмена, когда носителями теплоты являются микрочастицы вещества (молекулы), которые посредством теплового движения перемещаются из области с более высокой температурой в области с более низкой температурой;
- 2) теплообмен, который обусловлен совместным действием двух механизмов переноса теплоты: теплопроводностью и конвективным переносом, который осуществляется за счет движения самой среды из области высокой температуры в область низкой температуры;
- 3) вид теплообмена связанный с переносом энергии фотонов или электромагнитных волн.

7. Какое оборудование не считается теплообменным аппаратом:

- 4) парогенератор;
- 5) конденсатор;
- 6) экономайзер;
- 7) насос.

8. Указать выражение определяющее критерий Пекле:

- 1) $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$;
- 2) $Re = \frac{\omega d}{\nu}$;
- 3) $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}$;
- 4) $Pe = \frac{\omega d}{\alpha}$.

9. Какой критерий характеризует физические свойства жидкости и способность распространения тепла в жидкости:

- 1) Нуссельта;
- 2) Пекле;
- 3) Рейнольдса;
- 4) Прандтля.

10. Распределение скоростей по поперечному сечению трубопровода при турбулентном режиме движения жидкости осуществляется по закону:

- 1) гиперболы;
- 2) трапеции;
- 3) прямой;
- 4) параболы.

11. Область, в которой происходит изменение температуры жидкости от температуры стенки до температуры набегающего потока называется:

- 1) прилипшим слоем;
- 2) тепловым пограничным слоем;
- 3) пристенным слоем;
- 4) гидродинамическим пограничным слоем.

12. При каком температурном напоре Δt происходит устойчивое плёночное кипение?

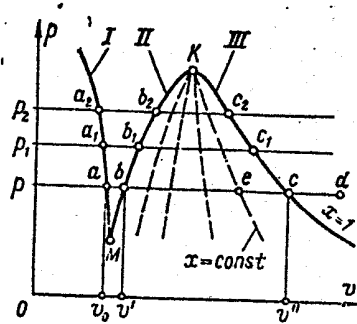
- 5) 100-200⁰С;
- 6) 5-30⁰С;
- 7) 100-1000⁰С;
- 8) 200-500⁰С.

13. Наличие какого фактора не оказывает влияния на ухудшение теплоотдачи в конденсаторе:

- 9) расположение труб в пучках;
- 10) наличие вакуума;
- 11) наличие воздуха в паре;
- 12) температура окружающего воздуха

Вариант 4

1. Какая линия в Pv -диаграмме водяного пара соответствует состоянию влажного насыщенного пара:

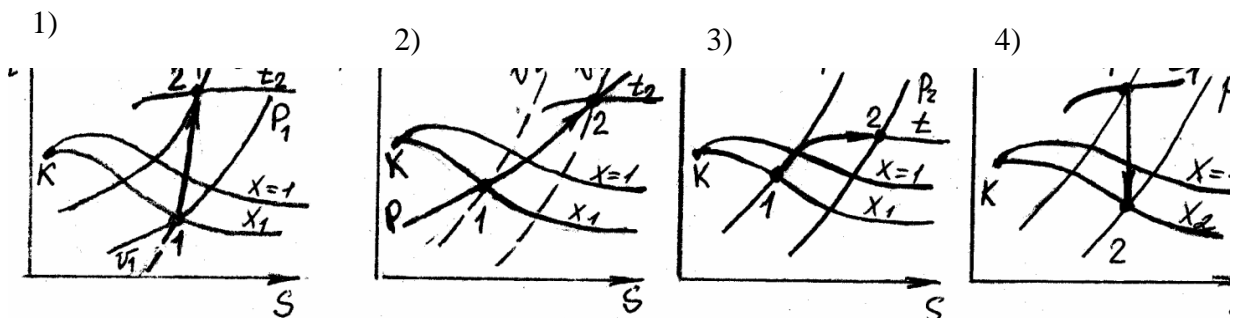


- 1.
- 1) a_1M ;
 - 2) $МК$;
 - 3) $КС$;
 - 4) bc .

2. Какой вид теплообмена называется теплопроводностью:

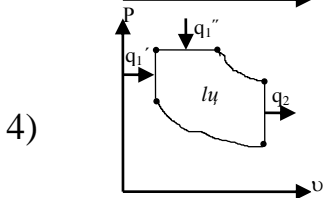
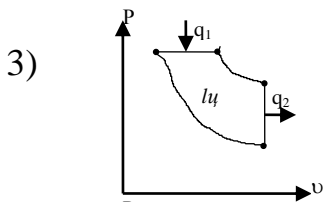
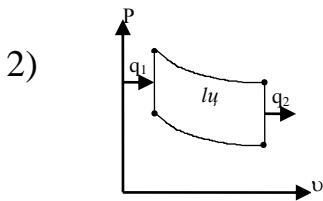
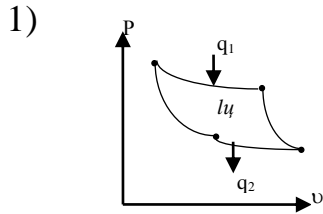
- 1) вид теплообмена, когда носителями теплоты являются микрочастицы вещества (молекулы), которые посредством теплового движения перемещаются из области с более высокой температурой в области с более низкой температурой;
- 2) теплообмен, который обусловлен совместным действием двух механизмов переноса теплоты: теплопроводностью и конвективным переносом, который осуществляется за счет движения самой среды из области высокой температуры в область низкой температуры;
- 3) вид теплообмена связанный с переносом энергии фотонов или электромагнитных волн.

3. Определить по i,S - диаграмме водяного пара, какой термодинамический процесс является адиабатным:

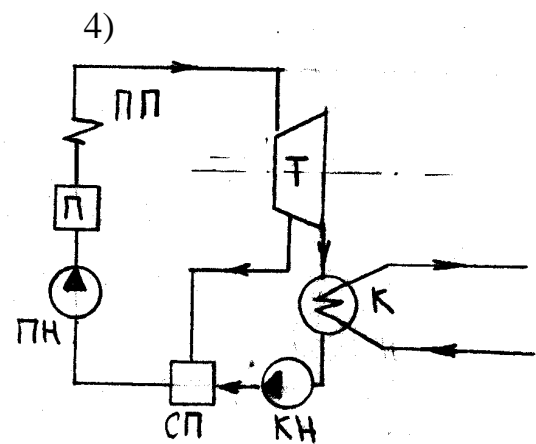
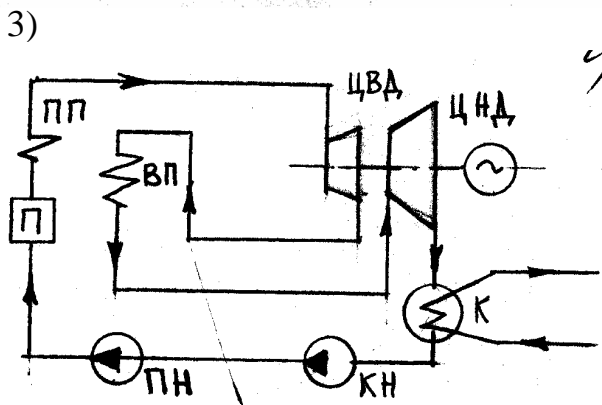
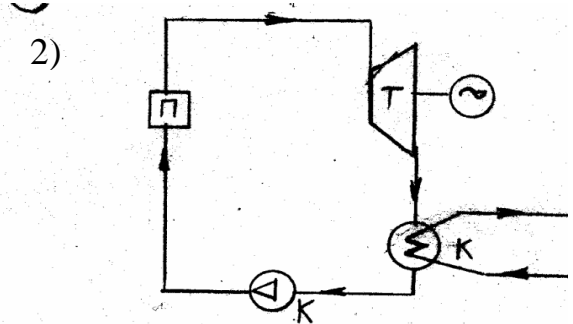
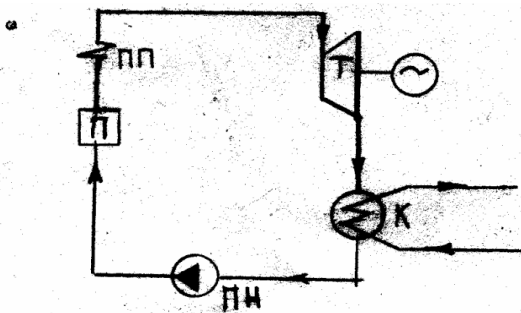


- 1.

4. Какая из диаграмм принадлежит прямому обратимому циклу Карно:



5. Указать какая схема паротурбинной установки является схемой со смешивающим регенеративным подогревателем:



6. Какой теплообменный аппарат называют смесительным:
- 1) аппарат, в котором одна и та же поверхность нагрева (или охлаждения) поочередно омывается то горячим, то холодным теплоносителем через определенные промежутки времени;
 - 2) аппарат, в котором теплота от греющего теплоносителя передается к нагреваемому через разделительную стенку;
 - 3) аппарат, в котором теплообмен осуществляется при непосредственном соприкосновении и смешивании горячей и холодной теплоносителей;
 - 4) аппарат, внутри которого непосредственно протекает какой-либо технологический процесс с выделением теплоты, для охлаждения которого применяют только один теплоноситель, забирающий теплоту от стенок аппарата.

7. Из каких циклов состоит цикл Карно:

- 5) 2^x адиабатных и 2^x изотермических;
- 6) 2^x изохорных и 2^x адиабатных;
- 7) 3^x изобарных и 2^x изотермических;
- 8) 2^x изохорных и 2^x изобарных.

8. Указать выражение определяющее критерий Нуссельта:

- 1) $E_U = \frac{\Delta P}{\omega^2 \rho}$;
- 2) $N_U = \frac{\alpha d}{\lambda}$;
- 3) $Pe = \frac{\omega d}{\alpha}$;
- 4) $Re = \frac{\omega d}{\nu}$.

9. Какой критерий характеризует отношение между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока:

- 1) Нуссельта;
- 2) Пекле;
- 3) Рейнольдса;
- 4) Прандтля.

10. Движение при котором наряду с продольными имеют место поперечные перемещения, а так же вращательные движения отдельных объемов жидкости, сопровождаемое пульсациями скоростей и давлений называется:

- 1) неустановившимся;
- 2) ламинарным;
- 3) турбулентным;
- 4) равномерным.

11. Ламинарному режиму движения жидкости соответствует число Рейнольдса:

- 1) $R_e = R_{eKP}$;
- 2) $R_e > R_{KP}$;
- 3) $R_e < R_{KP}$;
- 4) $R_e = \frac{\omega d}{\nu}$.

12. Наличие какого фактора не оказывает влияния на ухудшение теплоотдачи в конденсаторе:

- 1) наличие вакуума;
- 2) расположение труб в пучках;
- 3) наличие воздуха в паре;
- 4) температура окружающего воздуха.

13. При каком температурном напоре Δt происходит устойчивое пузырьчатое кипение?

- 5) $100 - 200^{\circ}\text{C}$;
- 6) $100 - 1000^{\circ}\text{C}$;
- 7) $200 - 500^{\circ}\text{C}$;
- 8) $5 - 30^{\circ}\text{C}$.

2.2 Методические указания к выполнению самостоятельного решения задач

Номер варианта задачи соответствует порядковому номеру студента в журнале. Вычисления выполняются с точностью до 2 значащих цифр, после запятой. Использовать размерность системы СИ. Размерность физических величин в окончательных результатах указывать обязательно.

При оформлении решении задач необходимо полностью записать условие задачи, затем выписать отдельно (можно в табличной форме) исходные данные с указанием единиц измерения. Перед каждым математическим действием необходимо пояснить, какая величина определяется по указанной формуле. Формула сначала записывается в буквенном выражении, затем в нее подставляются численные значения и только потом пишется ответ с указанием единиц измерения. В конце задачи отдельно пишется ответ или при необходимости вывод.

**Тема: Водяной пар и его свойства. P, v - и T, s - i, s -диаграммах.
Термодинамические процессы водяного пара**

Студент должен:
уметь:

определять параметры и состояние водяного пара с помощью таблиц водяного пара и i - s -диаграммы при различных термодинамических процессах; изображать процесс парообразования в PV , Ts и i - s -диаграммах;

Задание

1) Решить задачи и письменно ответить на вопросы для самоконтроля знаний, указанные в методических указаниях к самостоятельному изучению тем.

Задача 1

Водяной пар имеет первоначальные параметры $P_1=5$ МПа и $t_1=450^0$ С. После изобарного сжатия состояние водяного пара стало характеризоваться степенью сухости $X=0,95$. Определить параметры и состояние пара в т.1 и в т.2 (v ; s ; i ; t), используя i - s -диаграмму.

Задача 2.

Водяной пар имеет первоначальные параметры $P_1=2000$ КН/м² и $t_1=550^0$ С. После адиабатного расширения его давление стало $P_2=5$ КН/м². Определить по i - s -диаграмме параметры в первоначальном и конечном состояниях (v_1 ; s_1 ; i_1 ; и v_2 ; s_2 ; i_2 ; t_2), указать состояние пара в т.1 и в т.2.

Задача 3

Водяной пар имеет первоначальные параметры $P_1=5 \text{ КН/м}^2$ и $X=0,8$.
Определить параметры в конечном состоянии (v ; s ; i ; t), если после адиабатного сжатия давление пара стало $P_2=5000 \text{ КН/м}^2$ и указать состояние пара в т.1 и в т.2, используя is -диаграмму.

Задача 4.

Водяной пар имеет первоначальные параметры $P_1=20 \text{ КН/м}^2$ и $X=0,85$.
Определить параметры в конечном состоянии (v ; s ; i ; t), если после адиабатного сжатия давление пара стало $P_2=3000 \text{ КН/м}^2$ и указать состояние пара в т.1 и в т.2, используя is -диаграмму.

Пример

1 кг перегретого пара с начальным состоянием $p_1, \text{ МПа}, v_1, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$ изобарно сжимается ($p = \text{const}$) до конечного состояния со степенью сухости x_2 . Найти значение всех параметров в начальном и конечном состояниях, изменение внутренней энергии, количество отводимой теплоты и работу расширения по IS диаграмме.

Дано:

$$p_1 = 0,1 \text{ МПа}$$

$$v_1 = 3 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

$$x_2 = 0,99$$

$$p = \text{const}$$

$$t_1 - ?; i_1 - ?; S_1 - ?;$$

$$t_2 - ?; i_2 - ?; S_2 - ?$$

$$\Delta u - ?; l - ?; q - ?$$

Решение:

По IS диаграмме определим данные в точке 1 и в точке 2:

$$t_1 = 360^\circ$$

$$i_1 = 3185 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$S_1 = 8,43 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

$$t_2 = 1000^\circ$$

$$i_2 = 2650 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$S_2 = 7,32 \frac{\text{кДж}}{\text{кгК}}$$

$$v_2 = 2 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

1) Найдем изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = (i_2 - p_2 \cdot v_2) - (i_1 - p_1 \cdot v_1)$$

$$\Delta u = (2650 - 100 \cdot 2) - (3185 - 100 \cdot 3) = 2450 - 2885 = -435 \text{ кДж}$$

2) Найдем количество отводимой теплоты:

$$q = i_2 - i_1$$

$$q = 2650 - 3185 = -535 \text{ кДж}$$

3) Найдем работу сжатия:

$$l = p \cdot (v_2 - v_1)$$

$$l = 100 \cdot (2 - 3) = -100 \text{ кДж}$$

Вывод: Количество теплоты уменьшается из-за постоянного давления при сжатии газа.

Рекомендуемая литература:
Л[1, с.108; 2, с.179].

2.3 Методические указания к выполнению написания рефератов

Источником информации для выполнения рефератов могут быть книги, журналы или сайты Интернета.

Тему реферата студент выбирает из списка указанного в методическом указании для самостоятельных работ. Студент может выбрать другую тему для реферата, предварительно согласовав ее с преподавателем.

Реферат выполняется в виде печатного текста на формате А4. Объем должен быть не менее трех листов печатного текста, выполненного размером шрифта 14. Оформление титульного листа указано в приложении.

Оформление текста реферата должно соответствовать общим требованиям оформления самостоятельной работы.

В текст реферата должны быть вставлены рисунки, схемы, чертежи, с обязательным их пояснением в тексте. Желательно размещение наглядных схем и чертежей на большом формате А1 и оформленном в виде плаката.

В конце работы необходимо указать список литературы, в который включаются лишь те источники, которые были непосредственно использованы при написании работы.

Тема: *Параметры состояния тела. Основные газовые законы. Газовые Смеси* (2ч).

Вопросы темы:

Приборы для измерения основных параметров состояния тела. Устройство и принцип действия приборов (манометры, термометры). Разновидности шкал измерения температуры (Цельсия, Кельвина, Фаренгейта)

Темы рефератов

1. Приборы для измерения основных параметров состояния тела.
2. Разновидности шкал измерения температуры

Содержание реферата

В содержание реферата необходимо отразить следующие вопросы:

- 1) Назначение и область применения прибора.
- 2) Изображение конструкции прибора.
- 3) Принцип работы прибора и измеряемые величины.

Рекомендуемая литература:

Л[1с. 9]; Журналы «Энергетик»

Тема: Теплообменные аппараты (7ч.)

Вопросы темы:

Интенсификация процессов теплообмена в теплообменниках. Тепловая защита теплообменных аппаратов. Теплообменные аппараты, устанавливаемые на тепловых электростанциях.

Использование нетрадиционных источников энергии. Ветроэнергетика. Водородная энергетика. Использование низкотемпературного тепла Земли, воздуха, воды, разности температур слоев морской воды, энергии волн. Использование вторичных энергетических ресурсов и тепловых отходов.

Теплообмен конвекцией и излучением в теплообменных аппаратах.

Влияние на теплообмен неполного омывания, загрязнения и неплотности поверхности нагрева

Темы рефератов

1. Методы интенсификация процессов теплообмена в теплообменниках.
2. . Теплообменные аппараты, устанавливаемые на тепловых электростанциях.
3. Тепловая защита теплообменных аппаратов.
4. Использование нетрадиционных источников энергии. Ветроэнергетика.
5. Использование нетрадиционных источников энергии. Водородная энергетика.
6. Использование низкотемпературного тепла Земли, воздуха, воды, разности температур слоев морской воды, энергии волн.
7. Использование вторичных энергетических ресурсов и тепловых отходов
8. Градирни.

Содержание реферата

В содержание реферата необходимо отразить следующие вопросы:

- 1) Описание конструкции и принципа работы теплообменного аппарата, его назначение и область применения, технические характеристики и рабочие параметры.
- 2) Виды тепловой защиты, материалы и их свойства, область применения.
- 3) Область применения нетрадиционных источников энергии.
- 4) Характеристика и область применения вторичных энергетических ресурсов и тепловых отходов

Рекомендуемая литература:

Л[1, с.336; 5, с.460; 6, с. 478]; Журналы «Энергетик».

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ф.М. Костерев, В.И. Кушнырев «Теоретические основы теплотехники» - М.: Энергия, 1978 -360с.
2. О.М. Рабинович «Сборник задач по технической термодинамике» - М.: Машиностроение, 1969 -376с.
3. О.В. Черняк «Основы теплотехники и гидравлики» - М.: Высшая школа, 1974 - 287с.
4. Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел «Задачник по теплопередаче» - М.: Энергия, 1969 -176с.
5. И.Н.Сушкин «Теплотехника» -М.: Metallургия, 1973 -479с.
6. «Теоретические основы теплотехники. Справочник». Под общ. Ред. Чл.-корр. РАН А.В. Клименко и проф. В.М.Зорина.-3-е изд., перераб. И доп. – М.:Издательство МЭИ, 2001 – 564с.)

Приложение А

Таблица П5-Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения
(по температурам) (1 бар = 0,1 МПа)

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{бар}$	$\nu', \text{м}^3/\text{кг}$	$\nu'', \text{м}^3/\text{кг}$	$i', \text{кДж/кг}$	$i'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$s', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$s'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
0	0,006108	0,0010002	206,321	-0,04	2501,0	2501,0	-0,0002	9,1565
5	0,008718	0,0010000	147,167	21,01	2510,2	2489,2	0,0762	9,0258
10	0,012271	0,0010003	106,419	41,99	2519,4	2477,4	0,1510	8,9009
20	0,023368	0,0010017	57,833	83,86	2537,7	2453,8	0,2963	8,6674
30	0,042417	0,0010043	32,929	125,66	2555,9	2430,2	0,4365	8,4537
40	0,073749	0,0010078	19,548	167,45	2574,0	2406,5	0,5721	8,2576
50	0,12335	0,0010121	12,048	209,26	2591,8	2382,5	0,7035	8,0771
60	0,19919	0,0010171	7,6807	251,09	2609,5	2358,4	0,8310	7,9106
70	0,31161	0,0010228	5,0479	292,97	2626,8	2333,8	0,9548	7,7565
80	0,47359	0,0010292	3,4104	334,92	2643,8	2308,9	1,0752	7,6135
90	0,70108	0,0010361	2,3624	376,94	2660,3	2283,4	1,1925	7,4805
100	1,01325	0,0010437	1,6738	419,06	2676,3	2257,2	1,3069	7,3564
120	1,9854	0,0010606	0,89202	503,7	2706,6	2202,	1,6276	7,1310
140	3,6136	0,0010801	0,50875	589,1	2734,0	2144,9	1,7390	6,9307
160	6,1804	0,0011022	0,30685	675,5	2757,7	2082,2	1,9425	6,7498
180	10,027	0,0011275	0,19381	763,1	2777,1	2014,0	2,1393	6,5838
200	15,551	0,0011565	0,12714	852,4	2791,4	1939,0	2,3307	6,4289
220	23,201	0,0011900	0,08602	943,7	2799,9	1856,2	2,5178	6,2819
240	33,480	0,0012291	0,05964	1037,6	2801,6	1764,0	2,7021	6,1397
260	46,940	0,0012756	0,04212	1135,0	2795,2	1660,2	2,8850	5,9989
280	64,191	0,0013324	0,03010	1237,0	2778,6	1541,6	3,0687	5,8555
300	85,917	0,0014041	0,02162	1345,4	2748,4	1403,0	3,2559	5,7038
320	112,90	0,0014995	0,00154 4	1463,4	2699,6	1236,2	3,4513	5,5356
340	146,08	0,0016390	0,01078	1596,8	2622,3	1025,5	3,6638	5,3363
360	186,74	0,0018390	0,00697 0	1763,1	2485,7	722,6	3,9189	5,0603
374	220,84	0,002834	0,00348 2	2039,2	2150,7	111,5	4,3374	4,5096

Параметры критического состояния:

$t_{\text{кр}} = 374,12 \text{ } ^\circ\text{C}$; $P_{\text{кр}} = 221,15 \text{ бар}$; $\nu_{\text{кр}} = 0,003147 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Приложение А

Таблица П6 - Сухой насыщенный пар и вода на кривой насыщения (подавлениям)
(1 бар = 0,1 МПа)

P , бар	t , °C	ν' , м ³ /кг	ν'' , м ³ /кг	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/(кг· К)	s'' , кДж/(кг· К)
0,025	21,094	0,0010020	54,256	88,44	2539,7	2451,3	0,3119	8,6431
0,030	24,098	0,0010027	45,668	101,00	2545,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,035	26,692	0,0010033	39,480	111,84	2549,9	2438,1	0,3907	8,5224
0,040	28,981	0,0010040	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,050	32,90	0,0010052	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,060	36,18	0,0010064	23,742	151,50	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
0,070	39,02	0,0010074	20,532	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,2760
0,08	41,53	0,0010084	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289
0,09	43,79	0,0010094	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875
0,10	45,83	0,0010102	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,15	54,00	0,0010140	10,025	225,98	2598,9	2372,9	0,7549	8,0089
0,20	60,09	0,0010172	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092
0,25	64,99	0,0010199	6,2060	271,99	2618,1	2346,1	0,8932	7,8321
0,30	69,12	0,0010223	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,40	75,89	0,0010265	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,50	81,35	0,0010301	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,60	85,95	0,0010333	2,7329	359,93	2653,6	2293,7	1,1454	7,5332
0,70	89,96	0,0010361	2,3658	376,77	2660,2	2283,4	1,1921	7,4811
0,80	93,51	0,0010387	2,0879	391,72	2666,0	2274,3	1,2330	7,4360
0,90	96,71	0,0010412	1,8701	405,21	2671,1	2265,9	1,2646	7,3963
1,00	99,63	0,0010434	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3601

продолжение таблицы П6

$P,$ бар	$t,$ °C	$\nu',$ мЗ/кЗ	$\nu'',$ мЗ/кЗ	$i',$ кДж/кЗ	$i'',$ кДж/кЗ	$r,$ кДж/кЗ	$s',$ кДж/(кЗ·К)	$s'',$ кДж/(кЗ·К)
1,20	104,81	0,0010476	1,4289	439,36	2683,8	2244,4	1,3609	7,2996
1,40	109,32	0,0010513	1,2370	458,42	2690,8	2232,4	1,4109	7,2480
1,60	113,32	0,0010547	1,0917	475,38	2696,8	2221,4	1,4550	7,2032
1,8	116,03	0,0010579	0,9773	490,70	2702,1	2211,4	1,4944	7,1638
2,0	120,23	0,0010608	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5301	7,1286
2,5	127,43	0,0010675	0,7188	535,4	2717,2	2181,8	1,6072	7,0540
3,0	133,54	0,0010735	0,60578	561,4	2725,5	2164,1	1,6717	6,9930
3,5	138,88	0,0010786	0,52425	584,3	2732,5	2148,2	1,7273	6,9414
4,0	143,62	0,0010839	0,46242	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
4,5	147,92	0,0010885	0,41392	623,2	2743,8	2120,6	1,8204	6,8570
5,0	151,85	0,0010928	0,37481	640,1	2748,5	2108,4	1,8604	6,8215
6,0	158,84	0,0011009	0,31556	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598
7,0	164,96	0,0011082	0,27274	697,1	2762,9	2065,8	1,9918	6,7074
8,0	170,42	0,0011150	0,24030	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618
9,0	175,36	0,0011213	0,21484	742,6	2773,0	2030,4	2,0941	6,6212
10,0	179,88	0,0011274	0,19430	762,6	2777,0	2014,4	2,1382	6,5847
14,0	195,04	0,0011489	0,14072	830,1	2788,4	1958,3	2,2836	6,4665
16,0	201,37	0,0011586	0,12368	858,6	2792,2	1933,6	2,3436	6,4187
18,0	207,10	0,0011678	0,11031	884,6	2795,1	1910,5	2,3976	6,3759
20,0	212,37	0,0011766	0,09953	908,6	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373
24,0	221,78	0,0011932	0,08319	951,9	2800,4	1848,5	2,5343	6,2691
28,0	230,04	0,0012088	0,07138	990,5	2801,7	1811,2	2,6106	6,2101

продолжение таблицы П6

$P, \text{ба}$ p	$t, ^\circ\text{C}$	$\nu', \text{мЗ/кЗ}$	$\nu'', \text{мЗ/кЗ}$	$i', \text{кДж/кЗ}$	$i'', \text{кДж/кЗ}$	$r, \text{кДж/кЗ}$	$s', \text{кДж/(кЗ} \cdot \text{К)}$	$s'', \text{кДж/(кЗ} \cdot \text{К)}$
32,0	237,44	0,0012237	0,06243	1025,5	2801,8	1776,3	2,6786	6,1577
36,0	244,16	0,0012381	0,05540	1057,6	2801,0	1743,4	2,7402	6,1103
40	253,33	0,0012521	0,04974	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
44	256,05	0,0012657	0,04506	1115,5	2797,2	1681,7	2,8489	6,0268
48	261,38	0,0012792	0,04114	1141,9	2794,4	1652,5	2,8976	5,9891
50	263,92	0,0012858	0,03941	1154,6	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712
55	269,94	0,0013023	0,03561	1185,1	2788,4	1603,3	2,9761	5,9282
60	275,56	0,0013187	0,03241	1213,9	2783,2	1569,4	3,9277	5,8878
65	280,83	0,0013350	0,02969	1241,4	2777,6	1536,2	3,0764	5,8494
70	285,80	0,0013514	0,02734	1267,7	2771,4	1503,7	3,1225	5,8126
75	290,51	0,0013678	0,02530	1293,0	2764,7	1471,7	3,1663	5,7773
80	295,95	0,0013843	0,02349	1317,5	2757,5	1440,0	3,2083	5,7430
85	299,24	0,0014010	0,02189	1341,2	2749,9	1408,7	3,2487	5,7098
90	303,31	0,0014179	0,02046	1364,2	2741,8	1377,6	3,2875	5,6773
95	307,22	0,0014351	0,01917	1386,7	2733,4	1346,7	3,3251	5,6456
100	310,96	0,0014526	0,01800	1408,6	2724,4	1315,8	3,3616	5,6143
110	318,04	0,0014887	0,01597	1451,2	2705,4	1254,2	3,4316	5,5531
120	324,64	0,0015267	0,01425	1492,6	2684,8	1192,2	3,4986	5,4930
130	330,81	0,0015670	0,01277	1533,0	2662,4	1129,4	3,5633	5,4333
140	336,63	0,0016104	0,01149	1572,8	2638,3	1065,5	3,6262	5,3737
150	342,12	0,0016580	0,01035	1612,2	2611,6	999,4	3,6877	5,3122
160	347,32	0,0017101	0,009330	1651,5	2582,7	931,2	3,7486	5,2496
170	352,26	0,0017690	0,008401	1691,6	2550,8	859,2	3,8103	5,1841
180	356,96	0,0018380	0,007534	1733,4	2514,4	781,0	3,8739	5,1135

продолжение таблицы Пб

P , бар	t , °C	ν' , м ³ /кг	ν'' , м ³ /кг	i' , кДж/кг	i'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/(кг· К)	s'' , кДж/(кг· К)
190	361,44	0,0019231	0,00670 0	1778,2	2470,1	691,0	3,9417	5,0321
200	365,71	0,002038	0,00587 3	1828,8	2413,8	586,0	4,0181	4,9338
210	369,79	0,002218	0,00500 6	1892,2	2340,2	448,0	4,1137	4,8106
220	373,68	0,002675	0,00375 7	2007,7	2192,5	184,8	4,2891	4,5748

Параметры критического состояния:

$t_{кр} = 374,12$ °C; $P_{кр} = 221,15$ бар; $\nu_{кр} = 0,003147$ м³/кг.

Приложение А

Таблица П7 - Вода и перегретый пар (υ , м³/кг; i , кДж/кг; s , кДж/(кг·К); P , МПа)

P	0,004			0,01			0,05			0,1		
	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s
20	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	83,9	0,2963	0,0010017	84,0	0,2963
80	40,72	2650,2	8,7685	16,27	2649,3	8,3437	0,0010292	334,9	1,0752	0,0010292	355,0	0,0753
150	48,81	2783,2	9,1122	19,51	2782,8	8,6885	3,890	2780,0	7,9407	1,937	2776,4	7,6143
200	54,58	2879,6	9,3274	21,82	2879,3	8,9041	4,356	2877,5	8,1584	2,172	2875,2	7,8348
250	60,35	2977,3	9,5237	24,14	2977,1	9,1006	4,820	2975,8	8,3560	2,406	2974,2	8,0337
300	66,12	3076,5	9,7047	25,44	3076,3	9,2817	5,284	3075,3	8,5376	2,634	3074,1	8,2162
320	68,43	3116,6	9,7735	27,37	3116,4	9,3504	5,469	3115,5	8,6066	2,732	3114,4	8,2853
360	73,05	3197,5	9,9055	29,22	3197,4	9,4825	5,839	3196,6	8,7389	2,917	3195,7	8,4179
400	77,66	3279,5	10,031	31,06	3279,4	9,6081	6,209	3278,7	8,8646	3,103	3278,0	8,5439
420	79,97	3320,8	10,092	31,99	3320,7	9,6686	6,394	3320,2	8,9253	3,195	3319,5	8,6046
460	84,59	3404,3	10,209	33,83	3404,3	9,7858	6,764	3403,8	9,0425	3,380	3403,2	8,7220
500	89,20	3489,0	10,321	35,68	3844,9	9,8882	7,134	3488,5	9,1550	3,565	3487,9	8,8346
550	94,97	3596,3	10,455	37,99	3596,2	10,033	7,595	3595,8	9,2896	3,797	3545,4	8,9693
600	100,74	3705,3	10,584	40,29	3705,2	10,161	8,057	3704,9	9,482			

продолжение табл. П7

P	0,3			0,5			1,0			1,5		
	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s
20	0,0010016	84,1	0,2962	0,0010015	84,3	0,2962	0,0010013	84,8	0,2961	0,0010010	85,3	0,2960
80	0,0010291	335,1	1,0751	0,0010290	335,3	1,0750	0,0010287	335,7	1,0746	0,0010285	336,1	1,0743
150	0,6340	2761,2	7,0791	0,0010908	632,2	1,8416	0,0010904	632,5	1,8410	0,0010901	632,8	1,08405
200	0,7164	2865,6	7,3124	0,4250	2855,5	7,0602	0,2059	2827,5	6,6940	0,1324	2795,3	6,4522
250	0,7964	2967,5	7,5172	0,4744	2960,7	7,2716	0,2327	2942,8	6,9256	0,1520	2923,4	6,7100
300	0,8753	3069,2	7,7028	0,5226	3064,2	7,4606	0,2580	3051,3	7,1239	0,1697	3037,9	6,9192
320	0,9067	3110,0	7,6628	0,5416	3105,5	7,5314	0,2678	3094,0	7,1971	0,1765	3082,1	6,9949
360	0,9692	3192,0	7,9066	0,5796	3188,3	7,6665	0,2873	3178,9	7,3356	0,1899	3169,3	7,1372
400	1,0315	3274,9	8,0335	0,6172	3271,8	7,7944	0,3066	3264,0	7,4606	0,2030	3256,1	7,2701
420	1,0626	3316,6	8,0946	0,6360	3313,8	7,8558	0,3161	3306,6	7,5283	0,2095	3299,3	7,3334
460	1,125	3400,7	8,2126	0,6735	3398,3	7,9743	0,3351	3392,1	7,6482	0,2223	3385,9	7,4548
500	1,187	3485,8	8,3255	0,7109	3483,7	8,0877	0,3540	3478,3	7,7627	0,2351	3472,9	7,5703
550	1,264	3593,6	8,4606	0,7575	3591,7	8,2232	0,3776	3587,2	7,8991	0,2509	3582,5	7,7078
600	1,341	3702,9	8,5896	0,8040	3701,4	8,3525	0,4010	3697,4	8,0292	0,2667	3693,5	7,8386

продолжение табл. П7

P	2,0			2,5			3,0			3,5		
	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s
20	0,0010008	85,7	0,2959	0,0010006	86,2	0,2958	0,0010004	86,7	0,2957	0,0010001	87,1	0,2956
80	0,0010282	336,5	1,0740	0,0010280	336,9	1,0736	0,0010278	337,3	1,0733	0,0010275	337,7	1,0730
150	0,0010897	633,1	1,8399	0,0016894	633,1	1,8394	0,0010890	633,7	1,8388	0,0010887	634,0	1,8383
200	0,0011560	852,6	2,3300	0,0011555	852,8	2,3292	0,0011550	853,0	2,3284	0,0011545	853,2	2,3276
250	0,1115	2902,5	6,5460	0,08701	2879,9	6,4087	0,0758	2866,2	6,2867	0,05871	2828,1	6,1734
300	0,1255	3024,0	6,7679	0,09892	3009,4	6,6454	0,08116	2994,2	6,5408	0,06843	2978,2	6,4480
320	0,1308	3069,8	6,8466	0,10334	3057,1	6,7273	0,08500	3044,0	6,6262	0,07187	3030,3	6,5374
360	0,1411	3159,5	6,9929	0,1119	3149,6	6,8781	0,09232	3139,3	6,7818	0,07836	3128,9	6,6983
400	0,1512	3248,1	7,1285	0,1201	3239,9	7,0165	0,09933	3231,6	6,9231	0,08451	3223,1	6,8426
420	0,1561	3291,9	7,1927	0,1241	3284,5	7,0817	0,10276	3276,9	6,9894	0,08751	3269,2	6,9100
460	0,1659	3379,6	7,3156	0,1321	3373,2	7,2062	0,1095	3366,8	7,1115	0,09338	3360,3	7,0378
500	0,1756	3467,4	7,4323	0,1399	3461,9	7,3240	0,1161	3456,4	7,2345	0,09913	3450,8	7,1580
550	0,1876	3578,0	7,5708	0,1496	3573,3	7,4636	0,1243	3568,6	7,3752	0,1062	3563,9	7,2998
600	0,1995	3689,5	7,7024	0,1592	3685,5	7,5960	0,1324	3681,5	7,5084	0,1132	3677,5	7,4337

продолжение табл. П7

P	4,0			5,0			6,0			7,0		
	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s
20	0,0009999	87,6	0,2955	0,0009995	88,6	0,2952	0,0009990	89,5	0,2951	0,0009986	90,4	0,2948
80	0,0010273	338,1	1,0726	0,0010268	338,8	1,0720	0,0010263	339,6	1,0713	0,0010259	340,4	1,0707
150	0,0010883	634,3	1,8377	0,0010877	635,0	1,8366	0,0010870	635,6	1,8355	0,0010863	636,2	1,8344
200	0,0011540	853,4	2,3268	0,0011530	853,8	2,3253	0,0011519	854,2	2,3237	0,0011510	854,6	2,3222
250	0,0012512	1085,8	2,7936	0,0012494	1085,8	2,7911	0,0012476	1085,8	2,7887	0,0012458	1085,8	2,786
300	0,05885	2961,5	6,3634	0,04532	2925,4	6,2104	0,03616	2885,0	6,0693	0,0946	2839,2	5,9322
320	0,06200	3062	6,4573	0,04811	2986,2	6,3147	0,03876	2953,5	6,1869	0,03199	2917,8	6,0672
360	0,06787	3118,2	6,6237	0,05316	3095,9	6,4939	0,04331	3072,4	6,3811	0,03623	3047,6	6,2793
400	0,07339	3214,5	6,7713	0,05780	3196,9	6,6486	0,04738	3178,6	6,5438	0,03992	3159,7	6,4511
420	0,07600	3261,4	6,8399	0,06002	3245,4	6,7196	0,04931	3229,0	6,6175	0,04165	3212,1	6,5278
460	0,08128	3353,7	6,9694	0,06434	3340,0	6,8528	0,05303	3326,8	6,7546	0,04495	3312,8	6,6691
500	0,08638	3445,2	7,0909	0,06853	3433,8	6,9768	0,05662	3422,2	6,8814	0,04810	3410,5	6,7988
550	0,09264	3559,2	7,2338	0,07363	3549,6	6,1221	0,06096	3540,0	7,0291	0,05191	3530,2	6,9490
600	0,09879	3673,4	7,3686	0,07864	3665,4	7,2586	0,06521	3657,2	7,1673	0,05561	3649,0	7,0890

продолжение табл. П7

P	8,0			9,0			10,0			15		
	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s	υ	i	s
20	0,0009981	91,4	0,2946	0,0009977	92,3	0,2944	0,0009972	93,2	0,2942	0,0009950	97,9	0,2930
80	0,0010254	341,2	1,0700	0,0010249	342,0	1,0694	0,0010244	342,8	1,0687	0,0010221	346,8	1,0655
150	0,0010856	636,8	1,8334	0,0010850	637,5	1,8323	0,0010823	638,1	1,8312	0,0010811	641,3	1,8259
200	0,0011500	855,1	2,3207	0,0011490	855,5	2,3191	0,0011480	855,9	2,3176	0,0011432	858,1	2,3102
250	0,0012440	1085,8	2,7840	0,0012423	1085,9	2,7817	0,0012406	1085,9	2,7794	0,0012324	1086,2	2,7682
300	0,02425	2785,4	5,7918	0,0014022	1344,9	3,2539	0,0013978	1343,7	3,2494	0,0013779	1338,6	3,2284
320	0,02682	2878,1	5,9510	0,02268	2833,5	5,8341	0,01924	2782,0	5,7120	0,0014736	1455,0	3,4279
360	0,03089	3021,3	6,1849	0,02669	2993,2	6,0953	0,02330	2963,3	6,0086	0,01258	2771,3	5,5685
400	0,03431	3140,1	6,3670	0,02993	3119,7	6,2891	0,02641	3098,5	6,2158	0,01566	2977,6	5,8851
420	0,03589	3194,7	6,4469	0,03139	3176,7	6,3725	0,02779	3158,1	6,3031	0,01685	3055,3	5,9990
460	0,03888	3298,6	6,5928	0,03415	3284,1	6,5233	0,03036	3269,3	6,4511	0,01894	3190,0	6,1880
500	0,04172	3398,5	6,7254	0,03675	3386,4	6,6592	0,03277	3374,1	6,5984	0,02079	3309,7	6,3471
550	0,04512	3520,4	6,8783	0,03984	3510,5	6,8147	0,03561	3500,4	6,7568	0,02291	3448,7	6,5214
600	0,04841	3640,7	7,0201	0,04281	3632,4	6,9585	0,03833	3624,0	6,9025	0,02489	3581,2	6,6776

продолжение табл. П7

<i>P</i>	20,0			22,0			24,0			30,0		
	<i>ν</i>	<i>i</i>	<i>s</i>	<i>ν</i>	<i>i</i>	<i>s</i>	<i>ν</i>	<i>i</i>	<i>s</i>	<i>ν</i>	<i>i</i>	<i>s</i>
20	0,0009929	102,5	0,2919	0,0009920	104,4	0,2914	0,0009912	106,2	0,2910	0,0009886	111,7	0,2895
80	0,0010199	350,8	1,0623	0,0010190	352,4	1,0610	0,0010181	354,0	1,0598	0,0010155	358,7	1,0560
150	0,0010779	664,4	1,8207	0,0010767	645,7	1,8186	0,0010754	647,0	1,8166	0,0010718	650,0	1,8105
200	0,0011387	860,4	2,3030	0,0011369	861,4	2,3001	0,0011352	862,3	2,2973	0,0011300	865,2	2,2891
250	0,0012247	1086,8	2,7575	0,0012218	1087,1	2,7534	0,0012189	1087,4	2,7493	0,0012107	1088,5	2,7375
300	0,0013606	1334,6	3,2095	0,0013542	1333,3	3,2024	0,0013482	1332,1	3,1956	0,0013315	1329,0	3,1763
320	0,0014450	1446,3	3,4010	0,0014351	1443,4	3,3913	0,0014258	1440,8	3,3821	0,0014010	1434,3	3,3568
360	0,001823	1742,0	3,8818	0,001760	1721,8	3,8442	0,001716	1707,3	3,8158	0,001629	1678,6	3,7546
420	0,01119	2931,0	5,7202	0,009586	2872,8	5,6064	0,008205	2808,2	5,4876	0,004919	2557,2	5,0694
460	0,01315	3101,0	5,9590	0,01155	3062,2	5,8725	0,010204	3021,5	5,7873	0,007185	2885,4	5,5313
500	0,01477	3240,2	6,1440	0,01312	3210,8	6,0700	0,01174	3180,5	5,9987	0,008679	3083,9	5,7954
550	0,01655	3394,3	6,3373	0,01481	3371,8	6,2719	0,01336	3348,9	6,2099	0,010165	3277,7	6,0385
600	0,01816	3536,9	6,5055	0,01633	3518,8	6,4453	0,01480	3500,5	6,3888	0,01144	3444,2	6,235

Список используемой литературы

Основные источники:

- 1 Смирнова М.В. Теоретические основы теплотехники. - Волгоград: ИД «Ин-Фолио», 2015 г. - 272 с.: ил.
- 2 Прибытков И.А., Левицкий И.А. Теоретические основы теплотехники. - М.: Академия, 2015 г. - 680 с.: ил.
- 3 Брюханов О.Н., Мелик-Аракелян А.Т., Коробко В.И. Основы гидравлики и теплотехники -4-е изд., стер.-М.:Издательский центр «Академия», 2015-240 с.

Дополнительные источники:

- 1 Костерев Ф.М., Кушнырев В.И. Теоретические основы теплотехники. – М.: Энергия, 2013. - 360 с.: ил.
- 2 Рабинович О.М. Сборник задач по технической термодинамике.- М.: машиностроение, 2013 г. - 376 с.: ил.
- 3 Черняк О.В. Основы теплотехники и гидравлики. - М.: Высшая школа, 2013 г. - 287 с.: ил.
- 4 Теплотехника под редакцией Н.Н. Сушкина - М.: Металлургия, 2013 г. . – 686 с.: ил.
- 5 Краснощеков Е.А., Сухомел А.С. Задачник по теплопередаче. – М.: Энергия, 2013.- 176 с.: ил.