

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Лысьвенский филиал
федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования
**«Пермский национальный исследовательский
политехнический университет»**

ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ
для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине
«Теплотехника»
Приложение к рабочей программе дисциплины

Направление подготовки:	23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов	
Направленность (профиль) образовательной программы:	Эксплуатация транспортно-технологических и беспилотных машин	
Квалификация выпускника:	«Бакалавр»	
Выпускающая кафедра:	Общенаучных дисциплин	
Форма обучения:	Очная, заочная	
Курс: 3	Семестр: 5 (6)	
Трудоёмкость:		
Кредитов по рабочему учебному плану:		3 ЗЕ
Часов по рабочему учебному плану:		108 ч.
Форма промежуточной аттестации:		
Зачёт: 5 (6) семестр		

Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине является частью (приложением) к рабочей программе дисциплины. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине разработан в соответствии с общей частью фонда оценочных средств для проведения промежуточной аттестации основной образовательной программы, которая устанавливает систему оценивания результатов промежуточной аттестации и критерии выставления оценок. Фонд оценочных средств для проведения промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине устанавливает формы и процедуры текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по дисциплине.

1.Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине, объекты оценивания и виды контроля

Согласно РПД освоение учебного материала дисциплины запланировано в течение одного семестра (5-го семестра учебного плана очной формы обучения; 6-го семестра учебного плана заочной формы обучения) и разбито на 2 учебных раздела. В каждом разделе предусмотрены аудиторские лекционные и лабораторные работы, а также самостоятельная работа студентов. В рамках освоения учебного материала дисциплины формируются компоненты компетенций *знать, уметь, владеть*, указанные в РПД, которые выступают в качестве контролируемых результатов обучения по дисциплине (табл. 1.1).

Контроль уровня усвоенных знаний, усвоенных умений и приобретенных владений осуществляется в рамках текущего, рубежного и промежуточного контроля при изучении теоретического материала, сдаче отчетов по лабораторным работам зачета. Виды контроля сведены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1. Перечень контролируемых результатов обучения по дисциплине

Контролируемые результаты обучения по дисциплине (ЗУВы)	Вид контроля					
	Текущий		Рубежный		Итоговый	
	С	ТО	ОЛР	Т/КР		Зачёт
Усвоенные знания						
З.1 Знать способы применения естественнонаучных и общетехнических знаний, методов математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности		ТО	ОЛР	Т/КР		ТВ
Освоенные умения						
У.1 Уметь применять естественнонаучные и общетехнические знания, методы математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности			ОЛР	Т/КР		ПЗ
Приобретенные владения						
В.1 Владеть навыками применения естественнонаучных и общетехнических знаний, методов математического анализа и моделирования в профессиональной деятельности			ОЛР	Т/КР		ПЗ

С – собеседование по теме; ТО – коллоквиум (теоретический опрос); КЗ – кейс-задача (индивидуальное задание); ОЛР – отчет по лабораторной работе; Т/КР – рубежное тестирование (контрольная работа); ТВ – теоретический вопрос; ПЗ – практическое задание

Итоговой оценкой достижения результатов обучения по дисциплине является промежуточная аттестация в форме зачета, проводимая с учётом результатов текущего и рубежного контроля.

2. Виды контроля, типовые контрольные задания и шкалы оценивания результатов обучения

Текущий контроль успеваемости имеет целью обеспечение максимальной эффективности учебного процесса, управление процессом формирования заданных компетенций обучаемых, повышение мотивации к учебе и предусматривает оценивание хода освоения дисциплины. В соответствии с Положением о проведении текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации обучающихся по образовательным программам высшего образования – программам бакалавриата, специалитета и магистратуры в ПНИПУ предусмотрены следующие виды и периодичность текущего контроля успеваемости обучающихся:

- входной контроль, проверка исходного уровня подготовленности обучаемого и его соответствия предъявляемым требованиям для изучения данной дисциплины;
- текущий контроль усвоения материала (уровня освоения компонента «знать» заданных компетенций) на каждом групповом занятии и контроль посещаемости лекционных занятий;
- промежуточный и рубежный контроль освоения обучаемыми отдельных компонентов «знать», «уметь» заданных компетенций путем компьютерного или бланчного тестирования, контрольных опросов, контрольных работ (индивидуальных домашних заданий), защиты отчетов по лабораторным работам, рефератов, эссе и т.д.

Рубежный контроль по дисциплине проводится на следующей неделе после прохождения модуля дисциплины, а промежуточный – во время каждого контрольного мероприятия внутри модулей дисциплины;

- межсессионная аттестация, единовременное подведение итогов текущей успеваемости не менее одного раза в семестр по всем дисциплинам для каждого направления подготовки (специальности), курса, группы;
- контроль остаточных знаний.

2.1. Текущий контроль усвоения материала

Текущий контроль усвоения материала в форме собеседования или выборочного теоретического опроса студентов проводится по каждой теме. Результаты по 4-балльной шкале оценивания заносятся в книжку преподавателя и учитываются в виде интегральной оценки при проведении промежуточной аттестации.

2.2. Рубежный контроль

Рубежный контроль для комплексного оценивания усвоенных знаний, усвоенных умений и приобретенных владений (табл. 1.1) проводится в форме защиты лабораторных работ и рубежного тестирования и контрольных работ (после изучения каждого модуля учебной дисциплины).

2.2.1. Защита лабораторных работ

Всего запланировано 5 лабораторных работ. Типовые темы лабораторных работ приведены в РПД.

Защита лабораторных работ проводится индивидуально каждым студентом или группой студентов. Типовые шкала и критерии оценки приведены в общей части ФОС образовательной программы.

2.2.2. Рубежное тестирование

Запланированы рубежное тестирование (Т) после освоения студентами учебных разделов дисциплины.

Типовые шкала и критерии оценки рубежного тестирования приведены в общей части ФОС образовательной программы.

Типовые задания Т:

1. Явление теплопроводности имеет место при наличии градиента

1) концентрации; 2) температуры; 3) давления; 4) электрического заряда; 5) плотности.

2. Явление теплопроводности характеризует перенос...

1) энергии; 2) массы; 3) импульса направленного движения; 4) электрического заряда;

3. Правильная размерность удельной теплоемкости имеет вид _____ Дж/(кг·К);

4. Коэффициент теплопроводности λ имеет размерность _____ Вт/(м²·К);

5. Явление диффузии характеризует перенос...

1) энергии; 2) массы; 3) импульса направленного движения; 4) заряда; 5) температуры.

6. Явление диффузии имеет место при наличии градиента...

1) концентрации; 2) плотности; 3) давления; 4) скорости слоев жидкости или газа; 5) температуры.

7. Коэффициент теплоотдачи α имеет размерность _____ Вт/(м²·К);

8. Число Фурье $Fo = \alpha\tau/\delta^2$ характеризует _____

отношение температурного перепада к температурному напору;

9. Число Био $Bi = \alpha l/\lambda$ характеризует _____

отношение толщин динамического и температурного погранслоев;

10. Явление внутреннего трения имеет место при наличии градиента _____ скорости слоев жидкости или газа

11. При одномерном течении теплоносителя плотностью ρ со скоростью u в канале сечением f уравнение неразрывности имеет вид

1) $\rho/(uf) = \text{const}$; 2) $\rho u / f = \text{const}$; 3) $uf / \rho = \text{const}$; 4) $\rho u^2 / f = \text{const}$;

5) $\rho u f = \text{const}$.

12. Спектральная плотность энергетической светимости тела имеет размерность _____ Вт/м²;

13. Правильный вид закона теплового излучения Стефана-Больцмана...

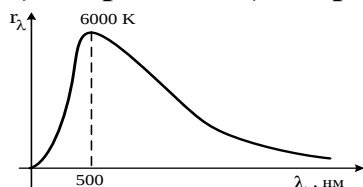
1) $R_e = \sigma/T^4$; 2) $R_e = \sigma T$; 3) $R_e = \sigma T^2$; 4) $R_e = \sigma T^3$; 5) $R_e = \sigma T^4$.

14. Правильный вид закона теплового излучения Вина ...

1) $\lambda_{\max} / T = b$; 2) $\lambda_{\max} \cdot T = b$; 3) $R_e = \sigma T^4$; 4) $R_{\lambda,T} / A_{\lambda,T} = r_{\lambda,T}$; 5) $\lambda_{\max} \cdot T^2 = b$.

15. На рисунке показана кривая зависимости спектральной плотности энергетической светимости абсолютно черного тела от длины волны при $T = 6000$ К. Если температуру тела уменьшить в 2 раза, то энергетическая светимость абсолютно черного тела уменьшится ...

1) в 2 раза; 2) в 4 раза; 3) в 8 раз; 4) в 16 раз; 5) в 32 раза.



2.2.2. Рубежная контрольная работа

Запланирована рубежная контрольная работа (КР) после освоения студентами учебных разделов дисциплины.

Типовые задания КР:

Задача 1. По горизонтально расположенной стальной трубе $\lambda = 20$ [Вт/(м·К)] со скоростью W_1 течет вода, имеющая температуру t_B . Снаружи труба охлаждается воздухом, температура которого $t_{\text{возд}}$, а давление 0,1 МПа. Определить коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 соответственно от воды к стенке трубы и от стенки трубы к воздуху; коэффициент теплопередачи K и тепловой поток $q_{\text{ц}}$, отнесенный к 1 м длины трубы, если внутренний диаметр равен d_1 , а внешний – d_2 . Данные по вариантам, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 1.2.

Указание. Для определения α_2 принять в первом приближении температуру наружной поверхности трубы t_2 равной температуре воды t_B .

Ответить на вопросы:

1. Какой режим течения внутри трубы в вашем варианте задачи?
2. Какой режим движения окружающего трубу воздуха?
3. Почему можно при расчете принять равенство температур $t_2 = t_B$?

Таблица 1.2. Исходные данные для решения задачи 1.

Последняя цифра шифра	$t_B, ^\circ\text{C}$	$W_1, \text{м/с}$	Предпоследняя цифра шифра	$t_{\text{возд}}, ^\circ\text{C}$	$d_1, \text{мм}$	$d_2, \text{мм}$
0	100	2,5	0	45	190	210
1	110	3,6	1	40	180	200
2	120	2,7	2	35	170	190
3	130	3,8	3	30	160	180
4	140	1,9	4	25	150	170
5	150	2,1	5	20	140	160
6	160	2,3	6	15	130	150
7	170	4,2	7	10	120	140
8	180	4,3	8	5	110	130
9	190	4,4	9	0	100	120

Пример решения

1. Определяем коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубы.

При $t_{\text{в}} = 170^{\circ}\text{C}$ определяем параметры воды :

- коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ж1}} = 0,679 \text{ Вт/(м*К)}$;
- коэффициент кинематической вязкости $\nu_{\text{ж1}} = 0,181 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- число Прандтля $\text{Pr}_{\text{ж1}} = 1,05$.

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_{\text{ж1d1}} = W_1 \cdot d_1 / \nu_1 = 2,1 \cdot 0,19 / (0,181 \cdot 10^{-6}) = 2,20 \cdot 10^6.$$

Так как $\text{Re}_{\text{ж1d1}} = 2,20 \cdot 10^6 > 10^4$, режим движения воды – турбулентный, критериальное уравнение для определения числа Нуссельта (горизонтальная труба) имеет вид:

$$\text{Nu}_{\text{ж1d1}} = 0,021 \cdot \text{Re}_{\text{ж1d1}}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{ж1}}^{0,43} = 0,021 \cdot (2,20 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot 1,05^{0,43} = 137.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_1 = \text{Nu}_{\text{ж1d1}} \cdot \lambda_{\text{ж1}} / d_1 = 137 \cdot 0,679 / 0,19 = 489,6 \text{ Вт/(м}^2\text{*К)}.$$

2. Определяем коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воздуху

При $t_{\text{возд}} = 18^{\circ}\text{C}$ определяем параметры воздуха:

- коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ж2}} = 0,0253 \text{ Вт/(м*К)}$;
- коэффициент кинематической вязкости $\nu_{\text{ж2}} = 14,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$;
- число Прандтля $\text{Pr}_{\text{ж2}} = 0,704$.

Определяем число Грасгофа:

$$\text{Gr}_{\text{ж2d2}} = g \cdot d_2^3 \cdot \beta \cdot \Delta t / \nu_2^2,$$

$$\Delta t = t_{\text{в}} - t_{\text{возд}} = 170 - 18 = 152^{\circ}\text{C}, \beta = 0,003436 \text{ К}^{-1}.$$

$$\text{Gr}_{\text{ж2d2}} = 9,81 \cdot 0,21^3 \cdot 0,003436 \cdot 152 / (14,18 \cdot 10^{-6})^2 = 2,36 \cdot 10^8.$$

Для горизонтальной трубы критериальное уравнение для определения числа Нуссельта имеет вид:

$$\text{Nu}_{\text{ж2d2}} = 0,05 \cdot (\text{Gr}_{\text{ж2d2}} \cdot \text{Pr}_{\text{ж2}})^{0,25} = 0,05 \cdot (2,36 \cdot 10^8 \cdot 0,704)^{0,25} = 57.$$

Получаем

$$\alpha_2 = \text{Nu}_{\text{ж2d2}} \cdot \lambda_{\text{ж2}} / d_2 = 57 \cdot 0,0253 / 0,21 = 6,87 \text{ Вт/(м}^2\text{*К)}..$$

3. Линейный коэффициент теплопередачи от воды к воздуху через цилиндрическую стенку:

$$k = 1 / [1/(d_1 \cdot \alpha_1) + (1 / 2\lambda) \cdot \ln(d_2/d_1) + 1/(\alpha_2 \cdot d_2)],$$

где d_1 – внутренний диаметр трубы;

d_2 – наружный диаметр трубы;

λ – коэффициент теплопроводности материала трубы, $\lambda = 20 \text{ Вт/(м*К)}$.

$$k = 1 / [1/(0,19 \cdot 489,6) + (1 / 2 \cdot 20) \cdot \ln(0,21/0,19) + 1/(6,87 \cdot 0,21)) = 1,42 \text{ Вт/(м*К)}.$$

Тепловой поток, отнесённый к 1 м трубы:

$$q_l = k \cdot \pi \cdot (t_{\text{в}} - t_{\text{возд}}) = 1,42 \cdot 3,14 \cdot (170 - 18) = 677,74 \text{ Вт/м}.$$

2.3. Промежуточная аттестация (итоговый контроль)

Допуск к промежуточной аттестации осуществляется по результатам текущего и рубежного контроля. Условиями допуска являются успешная сдача всех лабораторных работ и положительная интегральная оценка по результатам текущего и рубежного контроля.

2.3.1. Процедура промежуточной аттестации без дополнительного аттестационного испытания

Промежуточная аттестация проводится в форме зачета. Зачет по дисциплине основывается на результатах выполнения предыдущих индивидуальных заданий студента по данной дисциплине.

Критерии выведения итоговой оценки за компоненты компетенций при проведении промежуточной аттестации в виде зачета приведены в общей части ФОС образовательной программы.

2.3.2. Процедура промежуточной аттестации с проведением аттестационного испытания

В отдельных случаях (например, в случае переаттестации дисциплины) промежуточная аттестация в виде зачета по дисциплине может проводиться с проведением аттестационного испытания по билетам. Билет содержит теоретические вопросы (ТВ) для проверки усвоенных знаний, практические задания (ПЗ) для проверки освоенных умений и комплексные задания (КЗ) для контроля уровня приобретенных владений всех заявленных компетенций.

Билет формируется таким образом, чтобы в него попали вопросы и практические задания, контролирующие уровень сформированности *всех* заявленных компетенций.

2.3.2.1. Типовые вопросы и задания для зачета по дисциплине

Типовые вопросы для контроля усвоенных знаний:

1. Термодинамическая система. Параметры состояния и единицы их измерения.

Ответ: Совокупность макроскопических тел, которые при взаимодействии обмениваются энергией между собой и окружающей средой, называют термодинамической системой.

Взаимодействие в физике – воздействие тел или частиц друг на друга, приводящее к изменению состояния их движения.

Физические величины (например, давление, температура и т. д.), характеризующие состояние термодинамической системы в данный момент времени, называют параметрами состояния, или термодинамическими параметрами.

Число независимых параметров состояния равно числу степеней свободы термодинамической системы. Различают параметры состояния физической системы экстенсивные, т. е. пропорциональные массе системы (объем, внутренняя энергия, свободная энергия, энтропия, термодинамические потенциалы и другим видам энергий), и интенсивные, независимые от массы (давление, температура и прочие).

2. Идеальный газ, уравнение состояния идеального газа. Газовая постоянная и её физический смысл.

Ответ: Уравнение состояния идеального газа (Менделеева — Клапейрона) $PV = nRT$,

$R = 8,314$ -универсал. газ. постоянная.

Привести газ к норм. услов.(н.у.) это значит определить объем V_0 который будет занимать данное кол-во газа при P_0 и T_0 . $P_0 V_0 / T_0 = P_1 V_1 / T_1$.

Физический смысл R . $R = 8,314$ (Дж) которые совершает 1 моль идеального газа при расширении в результате нагревания на 1 К.

3. Теплоемкость рабочего тела. Смеси рабочих тел, способы задания, определение газовой постоянной и молярной массы смеси.

Ответ: В инженерной практике часто приходится иметь дело не с однородными газами, а со смесями химически не связанных между собой газов. Примерами газовых смесей могут служить: атмосферный воздух, природный газ, газообразные продукты сгорания топлив и т.д.

Для газовых смесей справедливы следующие положения.

1. Каждый газ, входящий в смесь, имеет температуру, равную температуре смеси.
2. Любой из газов, входящих в смесь, распространяется по всему объему смеси и поэтому объем каждого газа равен объему всей смеси.
3. Каждый из газов, входящих в смесь, подчиняется своему уравнению состояния.
4. Смесь в целом является как бы новым газом и подчиняется своему уравнению состояния.

В основе изучения газовых смесей лежит закон Дальтона, согласно которому при постоянной температуре давление смеси равно сумме парциальных давлений газов, входящих в смесь:

$$P_{\text{см}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i,$$

где $p_{\text{см}}$ - давление смеси;

p_i - парциальное давление i -го газа, входящего в смесь;

n - число газов, входящих в смесь.

Парциальным называют давление, которое окажет газ, входящий в смесь, если он один будет занимать весь объем смеси при той же температуре.

4. Термодинамические процессы

Ответ: Термодинамический процесс – это определенная последовательность изменения параметров состояния рабочего тела системы.

Термодинамические процессы могут быть равновесными и неравновесными, обратимыми и необратимыми. Если изменение состояния термодинамической системы протекает с нарушением ее внутреннего равновесия, то имеет место неравновесный термодинамический процесс. Реальные процессы, наблюдаемые в природе, в эксперименте, в машинах, являются неравновесными, их описание методами термодинамики невозможно.

С целью изучения основных свойств систем при обмене энергией с окружающей средой используют подход научной абстракции, идеализируют реальные процессы, принимая их за равновесные.

Термодинамический процесс, протекающий с бесконечно малым отклонением состояния системы от равновесного, называется равновесным.

Для равновесной термодинамической системы связь между термодинамическими параметрами устанавливается уравнением состояния идеального газа. Следовательно, это уравнение справедливо и для равновесного термодинамического процесса не только в начальном и конечном состояниях системы, но и в любом промежуточном ее состоянии.

В общем случае в процессе могут изменяться произвольно (независимо) два термодинамических параметра из трех. Изучение работы тепловых машин показывает, что наибольший интерес для практики представляют конкретные термодинамические процессы, а именно изменения состояния, протекающие при постоянных давлении, объеме, и температуре, а также без теплообмена с окружающей средой. Их характерной особенностью является то, что для совершенного газа величина теплоемкости на всем протяжении процесса остается неизменной.

5. Энергетические характеристики термодинамических систем: теплота, работа, внутренняя энергия, энтальпия.

Ответ: Понятие энергии в механике связывают либо с движением тел, либо с положением этих тел в силовом поле. Сохранение энергии рассматривается как постоянство суммы кинетической и потенциальной энергии, при этом не принимается во внимание внутреннее состояние этих тел. Однако движущееся тело имеет не только кинетическую и потенциальную энергии, но и определенную тепловую энергию (температуру). При контакте этого тела с другим телом, температура которого ниже первого, начнется переход тепловой энергии от первого тела ко второму, при этом внутреннее состояние обоих тел изменится, так как меняется запас энергии. С другой стороны, увеличение «запаса теплоты» может быть достигнуто за счет уменьшения кинетической энергии (например, удар пули о твердую

поверхность приводит к повышению температуры и поверхности, и пули). Нагретое тело при охлаждении может стать источником механической энергии, что реализуется в тепловых машинах.

Внутренняя энергия системы (U) включает в себя все виды энергии системы (кинетическую энергию поступательного, вращательного, колебательного движения молекул и все формы движения атомов, электронов, ядер и т.д.) за исключением кинетической и потенциальной энергии всего тела (системы). Изучение двух последних видов энергии не входит в задачи термодинамики.

Как и любую энергию, внутреннюю энергию нельзя измерить. Однако, можно определить ее изменение при переходе из одного состояния в другое.

В термодинамике обычно исследуют две формы передачи энергии от одной системы к другой – теплоту Q и работу A .

Теплота – неупорядоченная форма передачи энергии, которая переходит путем хаотического столкновения молекул соприкасающихся тел, т.е. путем теплопроводности или теплоизлучения. В термодинамике положительной ($Q > 0$) считается теплота, подведенная к системе. В термохимии подводимая к системе теплота имеет противоположный знак ($Q < 0$).

Работа – упорядоченная форма передачи энергии, общей чертой которой является перемещение масс, состоящих из очень большого числа молекул, под действием каких-либо сил. Положительной ($A > 0$) считается работа, совершаемая системой против действия внешних сил.

Теплота и работа характеризуют качественно и количественно две различные формы передачи энергии от одной части материального мира к другой.

В отличие от внутренней энергии, теплота и работа зависят от способа проведения процесса, т.е. являются функциями пути.

6. Политропные процессы, их исследование и графическое изображение на рабочей и тепловой диаграммах. Энергетические характеристики политропных процессов.

Ответ: К политропным относятся процессы, подчиняющиеся уравнению

$$p v^n = \text{const}$$

где n – показатель политропы, который может принимать значения $\pm\infty$. Для данного политропного процесса величина n постоянная.

Политропный процесс является обобщающим по отношению к основным термодинамическим процессам. Действительно:

если $n=0$, то из уравнения политропного процесса получим уравнение изобарного процесса, т.к. $p v^0 = \text{const}$ или $p = \text{const}$;

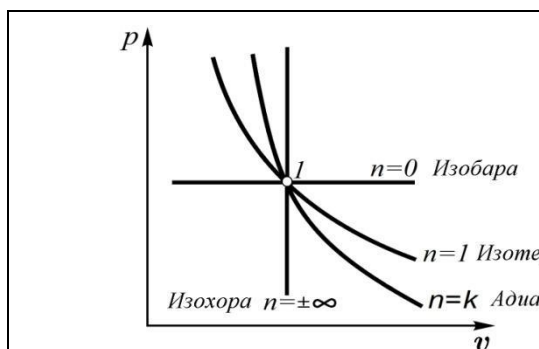


Рис. 2.10. График политропных процессов

если $n=1$, тогда $p v^1 = \text{const}$. Из уравнения состояния следует, что $p v = R T$. Следовательно, значению $n=1$ соответствует уравнение изотермического процесса $T = \text{const}$;

если $n=k$, то из уравнения политропного процесса получим уравнение адиабатного процесса $p v^k = \text{const}$;

если $n=\pm\infty$, то из уравнения политропного

$$v = \frac{\text{const}}{p^{\frac{1}{n}}} = \frac{\text{const}}{p^{\frac{1}{\infty}}} = \text{const}$$

процесса $p v^n = \text{const}$ получим т.е. уравнение изохорного процесса.

Связь между параметрами состояния газа в политропном процессе аналогичны связи в адиабатном

процессе, а именно

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n, \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}.$$

Определение количества теплоты q , подведенной к газу, совершенной им работы l и изменения его внутренней энергии Δu : По аналогии с адиабатным процессом:

$$\text{количество тепла, подведенного к газу } q = c(T_2 - T_1);$$

$$\text{изменение внутренней энергии газа } \Delta u = c_v(T_2 - T_1);$$

$$\text{работа газа в политропном процессе } l = \frac{1}{n-1} R(T_1 - T_2) = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2),$$

Подставляя значения q , Δu и l в уравнение первого закона термодинамики $q = \Delta u + l$, получим

$$c(T_2 - T_1) = c_v(T_2 - T_1) + \frac{1}{n-1} R(T_1 - T_2)$$

$$\text{или } c = c_v - \frac{R}{n-1} = c_v - \frac{c_p - c_v}{n-1}.$$

Окончательно для политропного процесса теплоемкость газа равна

$$c = c_v \frac{n-k}{n-1}$$

Таким образом, теплоемкость политропного процесса зависит от показателя политропы n и рода газа, т.к. c_v и k зависят от рода газа.

Теплоемкость в каждом политропном процессе имеет вполне определенную величину, зависящую от значений c_v , k и n . Причем, в зависимости от показателя политропы, теплоемкость может быть положительной или отрицательной, а в отдельных случаях равной нулю (в адиабатном процессе) или бесконечности (в изотермическом процессе). Действительно, в соответствии с (2.28):

в изобарном процессе $n=0$, тогда $c = c_p$;

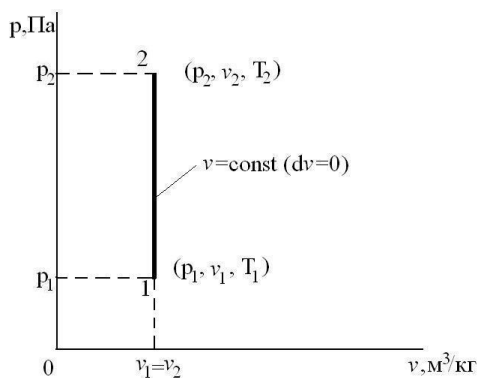
в изотермическом процессе $n=1 \rightarrow c = \infty$;

в адиабатном процессе $n=k \rightarrow c = 0$;

в изохорном процессе $n=\infty \rightarrow c = c_v$.

7. Частные случаи политропного процесса: изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы.

Ответ: Изохорный процесс – это процесс сообщения или отнятия теплоты от газа при постоянном объеме $v = \text{const}$.



Этот процесс используется как подготовительный процесс в циклах.

Соотношение между параметрами для конечного участка процесса 1-2 определяется

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

законом Шарля: $p_2 = \frac{p_1 T_2}{T_1}$, который следует из уравнений состояния для точек 1 и 2: $p_1 v_1 = RT_1$ и $p_2 v_2 = RT_2$ при $v_1 = v_2 = v = \text{const}$.

$$l_v = \int_{v_1}^{v_2} p dv = 0$$

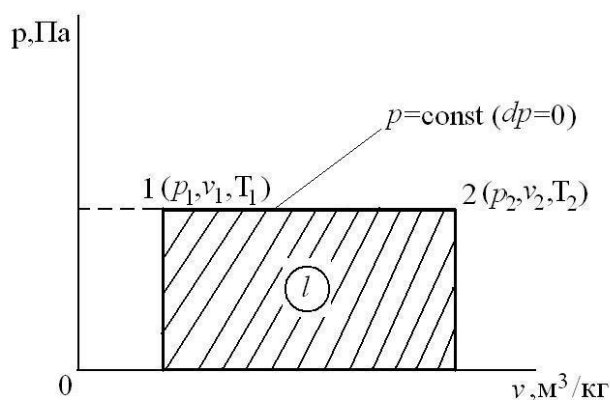
Поскольку работа расширения в этом процессе равна нулю: $l_v = 0$, т.к. $dv = 0$, то из уравнения 1-го закона термодинамики следует, что:

$$q_v = \Delta u = c_v (T_2 - T_1)$$

Таким образом, подведенная к газу в изохорном процессе теплота целиком идет на увеличение его внутренней энергии. Для ТП $v = \text{const}$ коэффициент распределения теплоты $\psi = \Delta u / q = 1$, теплоемкость $c = c_v$ и показатель политропы:

$$\gamma = \frac{c - c_p}{c - c_v} = \frac{c_v - c_p}{c_v - c_v} = \frac{c_v - c_p}{0} = \pm \infty$$

Изобарный процесс – это процесс сообщения или отнятия теплоты от газа при постоянном давлении $p = \text{const}$.



$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Соотношение между параметрами в процессе $p = \text{const}$: $\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}$ – закон Гей-Люссака, т.к.: $p_1 v_1 = RT_1$, $p_2 v_2 = RT_2$ и $p_1 = p_2 = p = \text{const}$.

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p(v_2 - v_1)$$

Работа расширения $l = p(v_2 - v_1)$. Т.к. $v = \frac{RT}{p}$, то $l = R(T_2 - T_1)$.

Следовательно, удельная газовая постоянная R – это работа, совершаемая 1 кг газа в процессе $p = \text{const}$ при его нагревании на один градус. Размерность R : Дж/кгК. Уравнение 1-го закона термодинамики в этом случае имеет вид:

$$q = \Delta u + l = c_v (T_2 - T_1) + R(T_2 - T_1) = c_p (T_2 - T_1) = \Delta h = h_2 - h_1$$

Таким образом, вся теплота, подведенная к газу в изобарном процессе, расходуется на увеличение его энтальпии.

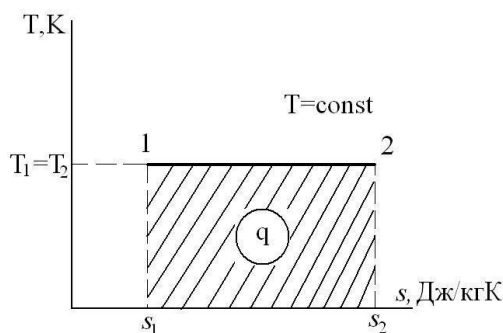
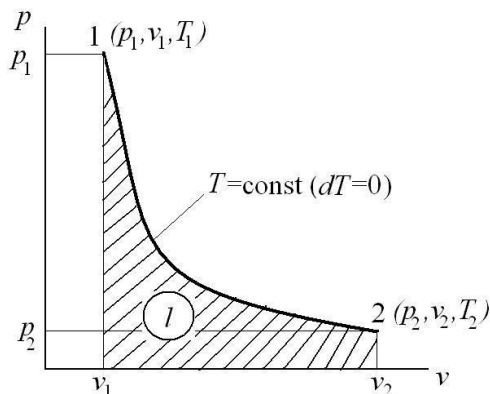
Коэффициент распределения теплоты в процессе $p = \text{const}$ равен:

$$\psi = \frac{\Delta u}{q} = \frac{c_v \Delta T}{c_p \Delta T} = \frac{1}{\gamma} \quad \hat{e} = \frac{c_p}{c_v}$$

Теплоемкость $c = c_p$ и показатель политропы

$$\gamma = \frac{c - c_p}{c - c_v} = \frac{c_\delta - c_p}{c_\delta - c_v} = \frac{0}{c_\delta - c_v} = 0$$

Изотермический процесс – это процесс сообщения или отнятия теплоты от газа при постоянной температуре



При $T=\text{const}$ из уравнения состояния $p v = R T$ имеем: $p v = \text{const}$ – это уравнение изотермического процесса является уравнением равнобокой гиперболы.

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

Тогда $p_1 v_1 = p_2 v_2$, и $\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}$ – закон Бойля-Мариотта.

Из уравнения 1-го закона термодинамики $q = \Delta u + l$ при $T = \text{const}$ имеем:

$\Delta u = c_v \Delta T = 0$ и $q = l$, т.е. вся теплота, сообщаемая газу в изотермическом процессе, целиком идет на работу расширения газа.

Изменение энтальпии в процессе $T = \text{const}$ равно:

$$\Delta h = c_p \Delta T = 0$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv = p_1 v_1 \int_{v_1}^{v_2} \frac{dv}{v} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Работа расширения

Коэффициент распределения теплоты

$$\psi = \frac{\Delta u}{q} = 0$$

$$c = \frac{c_v}{\psi} = \infty$$

Тогда теплоемкость ψ и показатель политропы для процесса $T = \text{const}$ будет

$$\gamma - 1 = \frac{c - c_p}{c - c_v} - 1 = \frac{c_v + c_p}{\infty} = 0, \text{ т.е. } \gamma = 1.$$

Адиабатный процесс – это процесс, протекающий без внешнего теплообмена, т.е. $q = 0$ и $\delta q = 0$ (на конечном и бесконечно малом участке процесса).

Если записать для этого случая уравнения 1-го закона термодинамики в виде:

$$1. \delta q = dh - v dp = 0, \text{ или } c_p dT - v dp = 0,$$

$$2. \delta q = du + p dv = 0, \text{ или } c_v dT + p dv = 0, \text{ то после деления (1) на (2) получим:}$$

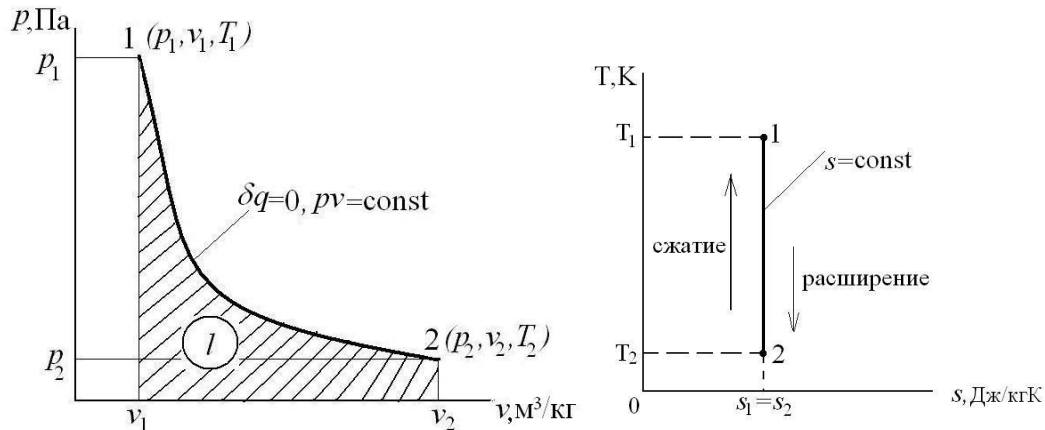
$$\hat{e} = \frac{c_p}{c_v} = - \frac{v}{p} \frac{dp}{dv} - \text{показатель адиабаты.}$$

$$\frac{dp}{p} = -\epsilon \frac{dv}{v}$$

Тогда после интегрирования выражения для конечного процесса 1-2 будем

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^\epsilon$$

иметь $p v^\epsilon = \text{const}$, или $p v^\epsilon = \text{const}$ - это есть уравнение адиабатного процесса в p - v -координатах, которое является уравнением неравнобокой гиперболы.



$\delta q = T ds = 0$, т.к. $T \neq 0$, то $ds = 0$ и $s = \text{const}$. Таким образом, адиабатный процесс с идеальным газом есть изоэнтропийный процесс.

8. Сущность второго закона термодинамики и его различные формулировки (Клаузиуса, Томсона, Больцмана, Стирлинга).

Ответ: Второе начало термодинамики— физический принцип, накладывающий ограничение на направление процессов передачи тепла между телами.

Второе начало термодинамики гласит, что невозможен самопроизвольный переход тепла от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому.

Второе начало термодинамики запрещает так называемые вечные двигатели второго рода, показывая что коэффициент полезного действия не может равняться единице, поскольку для кругового процесса температура холодильника не должна равняться 0.

Существуют несколько эквивалентных формулировок второго начала термодинамики:

Постулат Клаузиуса: «Невозможен процесс, единственным результатом которого являлась бы передача тепла от более холодного тела к более горячему» (такой процесс называется процессом Клаузиуса).

Постулат Томсона: «Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара» (такой процесс называется процессом Томсона).

Эквивалентность этих формулировок легко показать. В самом деле, допустим, что постулат Клаузиуса неверен, то есть существует процесс, единственным результатом которого была бы передача тепла от более холодного тела к более горячему. Тогда возьмем два тела с различной температурой (нагреватель и холодильник) и проведем несколько циклов тепловой машины, забрав тепло Q_1 у нагревателя, отдав Q_2 холодильнику и совершив при этом работу $A = Q_1 - Q_2$. После этого воспользуемся процессом Клаузиуса и вернем тепло Q_2 от холодильника нагревателю. В результате получается, что мы совершили работу только за счет отъёма теплоты от нагревателя, то есть постулат Томсона тоже неверен.

С другой стороны, предположим, что неверен постулат Томсона. Тогда можно отнять часть тепла у более холодного тела и превратить в механическую работу. Эту работу можно превратить в тепло, например, с помощью трения, нагрев более горячее тело. Значит, из неверности постулата Томсона следует неверность постулата Клаузиуса.

Таким образом, постулаты Клаузиуса и Томсона эквивалентны.

Другая формулировка второго начала термодинамики основывается на понятии энтропии:

«Энтропия изолированной системы не может уменьшаться» (закон неубывания энтропии).

Такая формулировка основывается на представлении об энтропии как о функции состояния системы, что также должно быть постулировано.

В состоянии с максимальной энтропией макроскопические необратимые процессы (а процесс передачи тепла всегда является необратимым из-за постулата Клаузиуса) невозможны.

9. Энтропия - параметр состояния, ее физический смысл, изменение в процессах. Изменение энтропии в термодинамических процессах.

Ответ: Рассматривая КПД тепловой машины, работающей по циклу Карно,

$\eta = 1 - \frac{|Q_X|}{|Q_H|} = 1 - \frac{T_X}{T_H}$, можно отметить, что отношение температуры холодильника к температуре нагревателя равно отношению величин количества теплоты, отданного рабочим телом холодильнику, и количества теплоты, принятой от нагревателя. Это значит, что для идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, выполняется и такое соотношение:

$\frac{|Q_X|}{T_X} = \frac{|Q_H|}{T_H}$. Отношение $\frac{Q}{T}$ Лоренц назвал приведённой теплотой. Для элементарного процесса

приведённая теплота будет равна $\frac{\partial Q}{T}$. Значит, при реализации цикла Карно (а он является обратимым циклическим процессом) приведённая теплота остаётся неизменной и ведёт себя как функция состояния, тогда, как известно, что количество теплоты является функцией процесса.

Используя первое начало термодинамики для обратимых процессов, $\partial Q = C_{\mu V} \nu dT + PdV$ и деля обе части этого равенства на температуру, получим:

$$\frac{\partial Q}{T} = C_{\mu V} \nu \frac{dT}{T} + \frac{P}{T} dV$$

Выразим из уравнения Менделеева - Клапейрона $\frac{P}{T} = \frac{\nu R}{V}$, подставим в уравнение и получим:

$$\frac{\partial Q}{T} = C_{\mu V} \nu \frac{dT}{T} + \frac{\nu R}{V} dV$$

Учтём, что $\frac{dT}{T} = d(\ln T)$, а $\frac{dV}{V} = d(\ln V)$, подставим их в уравнение и получим:

$$\frac{\partial Q}{T} = d(C_{\mu V} \ln T + \nu R \ln V)$$

Правая часть этого равенства является полным дифференциалом, следовательно, при обратимых процессах и приведённая теплота тоже является полным дифференциалом, что является признаком функции состояния.

Функция состояния, дифференциалом которой является $\frac{\partial Q}{T}$, называется энтропией и обозначается S . Таким образом, энтропия – функция состояния. После введения энтропии формула (9-43) будет иметь вид:

$$\frac{\partial Q}{T} = dS,$$

где dS – приращение энтропии. Равенство справедливо только для обратимых процессов и удобно для расчёта изменения энтропии при конечных процессах:

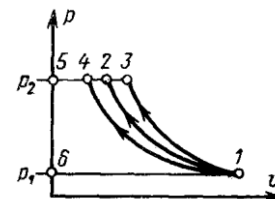
$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T}$$

Если система обратимым путём совершает круговой процесс (цикл), то $\oint \frac{\partial Q}{T} = 0$, а, следовательно, $\Delta S = 0$, то $S = \text{const}$.

10. Термодинамический анализ одно- и многоступенчатого компрессора.

Ответ: Несмотря на существенные конструктивные и принципиальные различия между компрессорами разных типов сущность термодинамического процесса в них одинакова, а именно, в общем случае в идеальном компрессоре происходит процесс политропного сжатия рабочего тела, изображаемый в $p\theta$ -диаграмме линией 1-2, причем техническая работа l_m , затрачиваемая на сжатие, является величиной отрицательной и изображается площадью 1-2-5-6-1.

Идеализуя условия протекания рабочего процесса, можно представить себе два крайних случая.



В первом случае стенки компрессора можно считать идеально теплонепроницаемыми и теплообмена между потоком рабочего тела и окружающей средой не происходит. Тогда процесс сжатия будет адиабатным и техническая работа в $p\theta$ -диаграмме изобразится площадью 1-3-5-6-1, а аналитически, если считать $\omega_1 = \omega_2$, она может быть найдена из уравнения, т. е.

$$l_T = i_1 - i_2.$$

Это выражение применимо в равной степени, как для газов, так и для паров.

Во многих случаях (например, при сжатии воздуха) рабочее тело можно считать идеальным газом. Тогда этому выражению можно придать другой вид.

$$l_T = i_1 - i_2 = u_1 - u_2 + (p_1 \theta_1 - p_2 \theta_2) = \frac{1}{k-1} (p_1 \theta_1 - p_2 \theta_2) + (p_1 \theta_1 - p_2 \theta_2) = \frac{k}{k-1} (p_1 \theta_1 - p_2 \theta_2)$$

В другом, крайнем случае стенки компрессора можно считать идеально теплопроводными, а охлаждение потока за счет отвода тепла в окружающую среду столь интенсивным, что температура его, равная при входе в компрессор температуре окружающей среды, остается постоянной. Тогда процесс сжатия будет изотермическим и техническая работа в $p\theta$ -диаграмме изобразится площадью 1-4-5-6-1, а аналитически может быть найдена из выражения, из которого получаем

$$l_T = i_1 - i_2 + q.$$

Для изотермического процесса идеального газа $i_1 = i_2$, следовательно,

$$l_T = q = RT \ln \frac{\theta_2}{\theta_1}.$$

Рассмотрение $p\theta$ -диаграммы показывает, что затрата технической работы при адиабатном сжатии будет наибольшей, она уменьшается по мере увеличения количества отводимого тепла, а при изотермическом сжатии получается наименьшей. Этим определяется техническая целесообразность устройства водяного охлаждения стенок компрессора.

Однако практически осуществить отвод тепла настолько интенсивный, что процесс будет изотермическим, невозможно. Поэтому более реальным является процесс политропного

сжатия, при котором кривая процесса сжатия располагается между адиабатой и изотермой, т. е. показатель политропы $1 < n < k$.

Техническая работа, затрачиваемая на привод компрессора, в этом случае составляет

$$l_T = \frac{n}{n-1} (p_1 \vartheta_1 - p_2 \vartheta_2),$$

а количество отводимой теплоты определяется по формуле

$$q = c_g \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1).$$

11. Способы распространения теплоты: теплопроводность, конвекция, излучение, их сравнительный анализ. Теплоотдача и теплопередача.

Ответ: К тепловым процессам относятся нагревание, охлаждение, конденсация, испарение. В производстве искусственных строительных материалов тепловая обработка является необходимым переделом при изготовлении большинства видов изделий. Зачастую эта операция – конечная стадия технологической переработки, определяющая свойства материала и качество получаемых изделий.

Различают три способа передачи теплоты: теплопроводность (кондукция), конвекция (перемешивание) и тепловое излучение (лучистый теплообмен).

Теплопроводность, или кондукция, – процесс распространения теплоты путём непосредственного соприкосновения между частицами тела. Теплопроводностью передается теплота в газах, жидкостях и твердых телах.

Основной закон распространения теплоты теплопроводностью (закон Фурье):

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad } t,$$

где Q – тепловой поток (тепловая мощность), Вт; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); A – площадь сечения, м²; grad t – температурный градиент, °C/м.

Конвекция – процесс распространения теплоты перемещением частиц. Плотность теплового потока, передаваемого конвекцией, описывается уравнением Ньютона-Рихмана

Лучистая энергия представляет собой энергию электромагнитных колебаний с различными длинами волн. Таким образом, носителем теплового излучения являются электромагнитные волны, которые распространяются в однородной изотропной среде или вакууме со скоростью света в соответствии с законами оптики.

Единицей измерения лучистой энергии служит Дж. Общее количество теплоты, излучаемое поверхностью F в единицу времени, называют лучистым тепловым потоком Q . Величину лучистого теплового потока, отнесенную к единице поверхности, называют поверхностной плотностью лучистого теплового потока или лучеиспускательной способностью.

12. Тепловой поток, плотность теплового потока. Температурное поле, температурный градиент. Закон Фурье. Дифференциальное уравнение теплопроводности.

Ответ: Теплопроводность представляет собой процесс распространения энергии между частицами тела (молекулами, атомами и т. п.), находящимися друг с другом в соприкосновении и имеющими различные температуры.

Теплопроводность обусловлена движением микрочастиц вещества. При этом в газах перенос энергии осуществляется путем диффузии молекул и атомов, а в жидкостях и твердых телах-диэлектриках – путем упругих волн. В металлах перенос энергии в основном осуществляется путем диффузии свободных электронов, роль упругих колебаний кристаллической решетки здесь второстепенна. Следует указать, что в жидкостях и газах чистая теплопроводность может быть реализована при выполнении условий, исключающих перенос теплоты конвекцией.

Всякое физическое явление в общем случае сопровождается изменением в пространстве и времени существенных для данного явления физических величин. Процесс теплопроводности, как и другие виды теплообмена, может иметь место только при условии, что в различных точках тела (или системы тел) температура неодинакова. В общем случае процесс передачи теплоты теплопроводностью в твердом теле сопровождается изменением температуры как в пространстве, так и во времени.

Аналитическая теория теплопроводности игнорирует молекулярное строение вещества: она рассматривает вещество не как совокупность отдельных дискретных частиц, а как сплошную среду – континуум. Такое модельное представление вещества может быть принято при решении задач распространения тепла, если размеры дифференциальных объемов достаточно велики по сравнению с размерами молекул и расстояниями между ними. Во всех расчетах и примерах тело предполагается однородным и изотропным.

Необходимым условием распространения теплоты является неравномерность распределения температуры в рассматриваемой среде. Таким образом, для передачи теплоты теплопроводностью необходимо неравенство нулю температурного градиента (7) в различных точках тела.

Теплота самопроизвольно переносится в сторону убывания температуры. Количество теплоты, переносимое через какую-либо изотермическую поверхность в единицу времени, называется тепловым потоком Q , Вт. Тепловой поток, отнесенный в единице поверхности тела, называют поверхностной плотностью теплового потока (или просто плотностью теплового потока) q , Вт/м².

13. Основы теории подобия. Критериальные уравнения теплоотдачи при свободном и вынужденном движении среды.

Ответ: При расчете и проектировании теплообменных устройств, как правило, требуется рассчитать тепловой поток при конвективной теплоотдаче от флюида к стенке или, наоборот, от стенки к флюиду. Как мы уже знаем (см. раздел 1 курса), в этом случае тепловой поток находят по закону теплоотдачи, который в 1701 году предложил великий английский ученый Исаак Ньютон

$$Q = \alpha \cdot \Delta T \cdot F \text{ или } q = \alpha \cdot \Delta T,$$

где $\Delta T = |T_w - T_f|$ – модуль разности температур между стенкой и флюидом, оС (K); T_w – температура поверхности теплообмена (стенки), оС (K); T_f – температура текучей среды (флюида) вдали от стенки, оС (K); Q – тепловой поток, Вт; $q = Q/F$ – поверхностная плотность теплового потока, Вт/м²; F – площадь поверхности теплообмена (площадь поверхности стенки), м²; α – средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·K).

При заданных геометрических размерах системы теплообмена, температурах стенки и текучей среды задача расчета теплового потока сводится к определению коэффициента теплоотдачи (α). Заметим, что коэффициент теплоотдачи не имеет физического смысла и выступает в роли коэффициента пропорциональности в законе теплоотдачи Ньютона. Из анализа закона Ньютона следует, что численно равен тепловому потоку с 1 м² поверхности теплообмена при ΔT между стенкой и текучей средой в 1 оС (K).

Коэффициент теплоотдачи находят, используя закон Ньютона, определив экспериментально тепловой поток и разность температур

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta T \cdot F}.$$

Однако для сложных систем теплообмена необходимо, в принципе, выполнить бесконечное множество экспериментов, поскольку коэффициент теплоотдачи зависит в общем случае от координат, скорости, температуры, физических свойств среды и т.д.:

$$\alpha = f(x_i, \vec{w}, T, v, \lambda, \rho, \dots).$$

Для уменьшения числа независимых переменных была разработана теория подобия. Теория подобия также дает правила моделирования и позволяет распространить результаты

ограниченного числа экспериментов на группу подобных явлений. Теория подобия базируется на трех положениях теоремы Кирпичева-Гухмана:

Подобные процессы должны иметь одинаковую физическую природу.

Должно выполняться подобие условий однозначности, а именно: геометрическое подобие, кинематическое подобие (подобие скоростей), динамическое (подобие сил), тепловое подобие (подобие тепловых потоков).

В модели и объекте моделирования (образце) определяющие критерии должны быть равны. В этом случае равны и определяющие критерии.

Критерий – безразмерный комплекс, который характеризует отношение физических эффектов, но не является этим отношением. Другими словами критерий представляет собой меру отношения физических эффектов. Определяемые критерии также называют числами подобия.

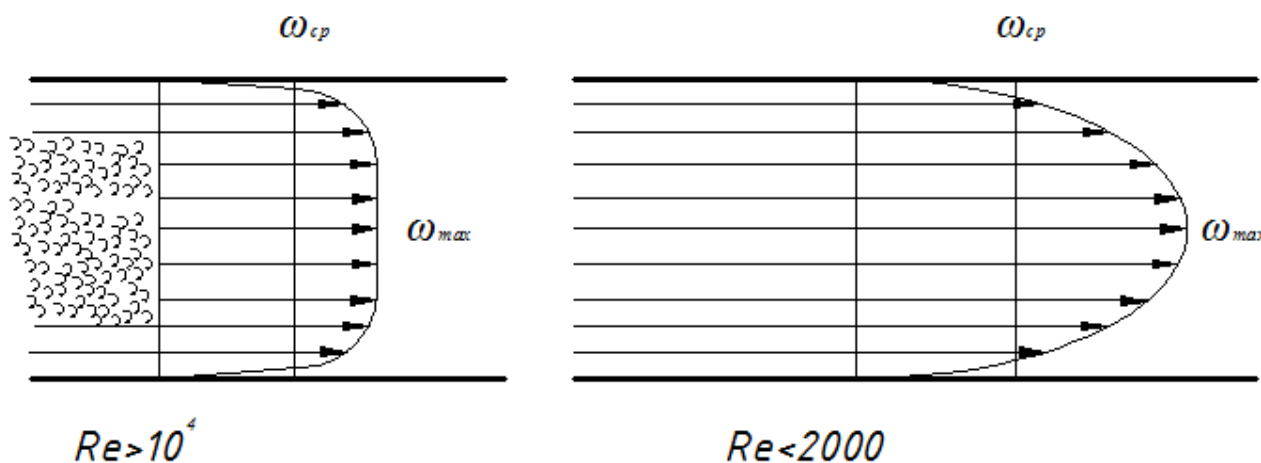
Все критерии можно разделить на две основные группы: определяемые и определяющие. Определяемые критерии находят из эксперимента, а от определяющих критериев зависит результат эксперимента. Существует и группа независимых критериев или параметров, к которым следует отнести безразмерные координаты и безразмерное время. Однако в обратных задачах конвективного теплообмена безразмерное время может быть определяемым критерием.

Любая комбинация критериев является тоже критерием.

Если процесс течения и теплообмена не зависит от какого-либо критерия, то этот процесс называют автомодельным (независимым) по отношению к этому критерию.

14. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах и каналах.

Ответ: При вынужденном движении жидкости теплоотдача в основном определяется режимом движения. По характеру движения жидкости различают два основных режима жидкости: ламинарный (слоистый) и турбулентный (вихревой). Ламинарный режим наблюдается при малых скоростях, турбулентный при больших, т. е. можно сделать вывод что режим движения зависит от скорости ω . Переход режима движения из ламинарного в турбулентный переходит как только скорость движения достигает критической, причем значение этой критической скорости различно, для различной жидкости.



Рейнольдс установил, что переход жидкости от ламинарного течения к турбулентному обусловлен значение безразмерного комплекса

$$Re = \frac{\omega \rho d}{\mu} = \frac{\omega d}{\nu}$$

Опытом он установил, что для любой жидкости при $Re < 2000$ наблюдается ламинарный режим. При $Re > 10^4$ развитое турбулентное движение.

Исходя из значения числа Re можно определить значение для критической скорости любой жидкости

$$\omega_{кр} = 2000 \frac{v}{d}$$

Между ламинарным и турбулентном движении жидкости в трубах помимо качественного имеется еще и количественное различия, показывающие существенное влияние на теплоотдачу. Оно заключается в различных законах изменения скоростей по сечению трубы: параболическое при ламинарном и более крутое у стенок и равномерное в ядре потока при турбулентном. Соответствен имеют разные значения отношения средней скорости по сечению к его максимальному значению:

$$\frac{\omega_{ср}}{\omega_{max}} = 0.5 = const$$

ламинарный:

$$\frac{\omega_{ср}}{\omega_{max}} = f(Re) = 0.8...0.9$$

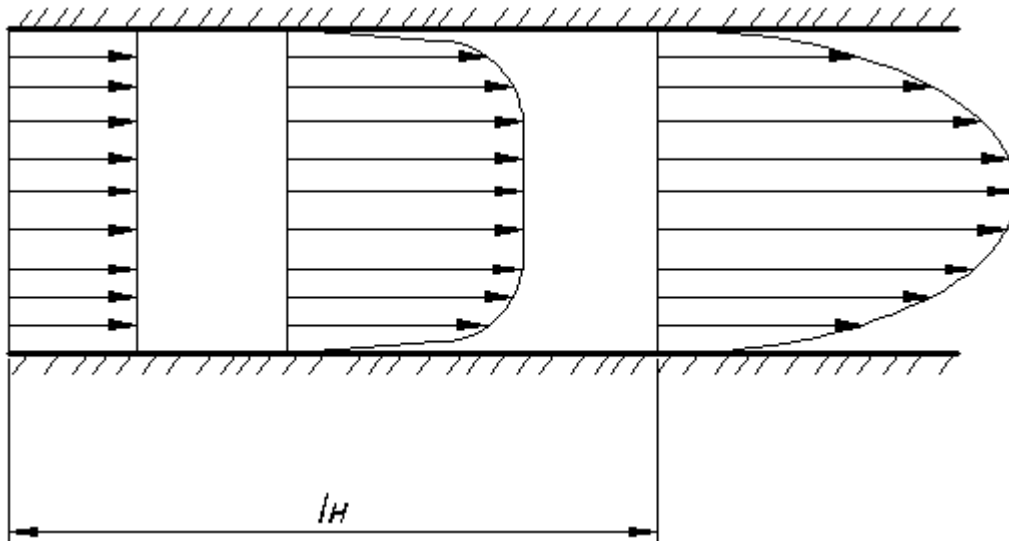
турбулентный:

Наличие этого участка обусловлено действием сил вязкостного трения.

Такие законы распределения скоростей характерны только для гидродинамически стабильного течения. Стабилизация наступает не сразу, а на некотором расстоянии l_n от входа в трубу. Если в трубу с закругленными кромками жидкость поступает из большого пространства, то на входе скорость постоянна. Далее, в следствии трения у стенки скорость убывает, а в центре потока растет. Так постепенно изменяясь на участке стабилизации эпюра скоростей принимает стабильный вид:

$l_n \approx 40d$ - при турбулентном режиме.

$l_n \approx 0,03 \cdot Re$ - при ламинарном режиме.



Так как на участке гидромеханической стабилизации характер движения жидкости меняется, то меняется теплоотдача. Поэтому при проведении исследований следует указывать имеет ли место гидромеханическая стабилизация или нет. В противном случае возможны ошибки.

При турбулентном режиме движения жидкости у стенки всегда имеется небольшой слой, в котором жидкость движется ламинарно. Это ламинарный пограничный слой. На участке гидромеханической стабилизации толщина этого пограничного слоя изменяется от $\delta=0$ на входе в трубу, до своего предельного значения. По своему абсолютному значению величина δ не велика и зависит от числа Re :

$$Re = 10^4 \rightarrow \frac{\delta}{d} = \frac{1}{466}; \quad Re = 10^5 \rightarrow \frac{\delta}{d} = \frac{1}{3660}; \quad Re = 10^6 \rightarrow \frac{\delta}{d} = \frac{1}{28400}$$

При нагреве или охлаждении жидкости в канале, по опытным данным, одновременно с гидродинамической стабилизацией проходит тепловая стабилизация. Она имеет место как при турбулентном, так и при ламинарном режиме.

На участке тепловой стабилизации проходит развитие теплового пограничного слоя.

На входе в трубу ядро потока в теплообмене не участвует и все тепловые изменения проходят только в пограничном тепловом слое.

15. Физическая сущность лучистого теплообмена, виды потоков излучения и радиационные характеристики тел.

Ответ: Лучистый теплообмен – самый распространенный в природе процесс переноса теплоты. Исключительная роль принадлежит этому виду теплообмена в развитии флоры и фауны на нашей планете и эволюции Вселенной. Расчет лучистых потоков проводится в камерах сгорания энергетических установок и в системах теплоснабжения ряда объектов сельскохозяйственного производства.

Тепловое излучение – это процесс распространения части внутренней энергии излучающего тела посредством электромагнитных волн со скоростью около 300 000 км/ч. Возбудителями электромагнитных волн являются заряженные материальные частицы. Излучение обладает не только волновыми, но и корпускулярными свойствами. Корпускулярность состоит в том, что лучистая энергия испускается и поглощается телами не непрерывно, а отдельными дискретными порциями – квантами или фотонами. Испускаемый фотон это частица материи, обладающая энергией и электромагнитной массой. Большинство твердых и жидких тел создает непрерывный спектр длин волн в диапазоне $\lambda = 0 \dots \infty$, из которого существенным в теплообмене считается инфракрасный ($\lambda = (0,8 \cdot 10^{-6} \dots 0,8 \cdot 10^{-3})$ м).

Теплообмен лучистой энергией между телами системы или системами называют лучистым теплообменом.

Тепловое излучение свойственно всем телам, и каждое тело излучает и поглощает энергию при любой температуре, даже близкой к абсолютному нулю. Интенсивность излучения зависит от природы тела, его температуры, длины волны, состояния поверхности. Непрозрачные твердые тела и жидкости поглощают и излучают энергию своей поверхностью; полупрозрачные тела, а также газы и пары характеризуются объемным характером излучения.

Энергия излучения, испускаемая произвольной поверхностью в единицу времени по всевозможным направлениям и по всем длинам волн спектра, называется полным лучистым потоком.

Полный, или интегральный, лучистый поток обозначается через Φ , за единицу лучистого потока принят ватт.

16. Основные законы теплового излучения (Планка, Вина, Стефана-Больцмана, Кирхгофа).

Ответ: 1) Закон Планка: определяет интенсивность изменения β_ν внутри замкнутой полости, стенки которой имеют постоянную температуру и находятся в тепловом равновесии с излучением. Мощность излучения ϵ в единичном интервале частот $\Delta \nu$ определяется

$$\epsilon(\nu, T) = \pi \beta_\nu(T) = \frac{2 \pi h / c^2 \nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1} \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Гц}} \right]$$

температурой (T) абсолютно черного тела:

2) Закон смещения Вина: дает зависимость λ , на которой поток излучения энергии черного тела достигает своего максимума, от температуры черного тела.

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} \approx 0,002898 \cdot \text{м} \cdot \text{К} \cdot \text{T}^{-1}, [\text{К}]$$

T – температура; $\lambda_{\max}$ – длина волны с максимальной интенсивностью; b – коэффициент, константа Вина, в СИ равен $0,002898 \cdot \text{м} \cdot \text{К}$.

3) Закон Стефана - Больцмана: излучательная способность абсолютно черного тела пропорциональна температуре в четвертой степени.

Серое тело – это тело, имеющее непрерывный спектр излучения и отношение элективной интенсивности излучения серого тела к селективной интенсивности излучения абсолютно черного тела, для всех длин волн и температур величина постоянная

4)Закон Ламберта: физический закон, согласно которому яркость L рассеивающий свет (диффузной) поверхности одинакова во всех направлениях. Светимость L и яркость M прямо пропорциональны.

Переходя к энергетическим величинам: количество лучистой энергии, излучаемое элементом поверхности dS_1 , в направлении элемента dS_2 , пропорционально произведению количества энергии, изучаемой по нормали, dQ_n на величину пространственного угла $d\omega$ и $\cos\varphi$, составленного направлением излучения с нормалью: $d^2Q_n = dQ_n \cdot d\omega \cdot \cos\varphi$.

5)Закон Кирхгофа: отношение излучающей способности тела к его поглощающей способности, равно излучающей способности абсолютно черного тела при данной температуре

17. Основы массообмена. Закон Фика. Формулы для потоков массы. Коэффициенты массопереноса. Тепло массообменные устройства.

Ответ: Технологические процессы, скорость протекания которых определяется скоростью переноса вещества (массы), называются массообменными. К массообменным процессам относятся: абсорбция, адсорбция, ионный обмен, перегонка и ректификация, растворение и кристаллизация, сушка, экстрагирование и экстракция, мембранные процессы [1].

Движущей силой массообменных процессов является разность концентраций. В результате растворения вещества в воде оно переходит из твердой фазы в жидкую. При очистке жидкостей или газов с помощью активированного угля вещество переводится из жидкой или газовой фазы в твердую. Разбавление растворов приводит к переходу вещества из одной жидкой фазы в другую.

Массообменные процессы принято классифицировать по агрегатному состоянию и характеру взаимодействия фаз. Переход вещества из одной фазы в другую в направлении достижения равновесия называется массопередачей. Значит, в основе представлений о массопередаче лежит понятие равновесия фаз. Массоперенос начинается, если концентрация вещества во взаимодействующих фазах отличается от равновесной. Достижение равновесия системы подчиняется принципу Ле-Шателье: реакция системы против внешнего воздействия направлена на уменьшение этого воздействия. При этом скорость перехода распределяемого вещества из одной фазы в другую пропорциональна разности между его фактической концентрацией в данной фазе и равновесной концентрацией. Это и есть истинная движущая сила этого процесса.

Состояние равновесия подчиняется правилу фаз Гиббса, которое гласит: для равновесной термодинамической системы, на которую из внешних факторов действуют только температура и давление, число степеней свободы C равно числу компонентов K минус число фаз Φ плюс два:

$$C = K - \Phi + 2.$$

Число степеней свободы – это число независимых переменных (температура, давление и концентрация вещества в фазах). Если однокомпонентная система состоит из двух фаз, находящихся в равновесии, число степеней свободы в этом случае равно 1. Это значит, что для нее произвольно выбирать можно только один параметр, с помощью которого эту систему можно будет вывести из равновесия и начать технологический процесс. Например, для однокомпонентной системы вода-пар от изменения давления изменяются температура смеси и количество воды, обращенной в пар.

Основной закон массопередачи формулируется исходя из общих кинетических закономерностей физико-химических процессов: скорость процесса прямо пропорциональна движущей силе и обратно пропорциональна сопротивлению:

$$\frac{dM}{dF d\tau} = \frac{\Delta C}{R},$$

где dM – количество вещества, перешедшего из одной фазы в другую,

dF – площадь поверхности фазового контакта;

$d\tau$ – продолжительность процесса массопередачи;

ΔC – движущая сила массообменного процесса;

R – сопротивление массопереносу.

Заменяя сопротивление R в уравнении (1.29) на коэффициент массопередачи $k_m = 1/R$ и проинтегрировав его по времени, получим для установившихся процессов основное уравнение массопередачи:

$$M = k_m \Delta C F$$

В процессах переноса распределяемого вещества из одной фазы в другую следует различать два случая: перенос из потока жидкости в поток жидкости; перенос из твердого тела в поток жидкости или в обратном направлении. Этот перенос подчиняется законам молекулярной диффузии, массоотдачи и теплопроводности.

Закон молекулярной диффузии (первый закон Фика). Молекулярная диффузия в газах и растворах жидкостей происходит в результате хаотического движения молекул, не связанного с движением потока жидкости. Благодаря этому осуществляется перенос вещества из области с высокой концентрацией в область с низкой концентрацией, который подчиняется первому закону Фика: количество диффундирующего вещества пропорционально градиенту концентрации, площади, перпендикулярной к направлению диффузного потока, через которую осуществляется перенос, и времени:

$$dM = -D \frac{\partial C}{\partial x} dF d\tau.$$

где D – коэффициент диффузии; $\partial C / \partial x$ – градиент концентрации в направлении диффузии; dF – площадь поверхности, через которую диффундирует вещество; $d\tau$ – продолжительность диффузии.

Коэффициент диффузии показывает, какое количество вещества переходит через поверхность равную 1 м² за 1 с при разности концентраций на расстоянии 1 м, равной единице.

Знак минус в уравнении показывает, что перенос вещества осуществляется навстречу градиенту концентраций. Размерность коэффициента диффузии зависит от размерности концентрации, но в системе СИ она имеет следующий вид [м²/с]. Эти коэффициенты измеряются опытным путем, и для большинства веществ эти данные приводятся в справочной литературе.

Заметим, что первый закон Фика является аналогом закона теплопроводности Фурье, а явления переноса теплоты и массы во многом схожи. Это обстоятельство и аналогичность в описании других законов тепло- и массопереноса используются при расчетах массопередачи.

Второй закон Фика – дифференциальное уравнение молекулярной диффузии. Аналогично дифференциальному уравнению теплопроводности Фурье дифференциальное уравнение молекулярной диффузии имеет следующий вид:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} \right)$$

Закон массоотдачи Щукарева. Этот закон является аналогом закона теплоотдачи (закона охлаждения) твердого тела Ньютона. Он был сформулирован русским ученым А.Н.Щукаревым при изучении кинетики растворения твердых тел: количество вещества, переносимого из одной фазы в другую, пропорционально разности концентраций у поверхности раздела фаз и в ядре потока воспринимающей фазы, площади поверхности фазового контакта и времени:

$$dM = \beta (C_r - C_f) dF d\tau,$$

где C_r и C_f – концентрации вещества у поверхности раздела и в ядре потока воспринимающей фазы;

β – коэффициент массоотдачи, имеющий размерность м/с.

Коэффициент массоотдачи показывает, какое количества вещества переносится из одной фазы в другую через 1 м² поверхности фазового контакта за 1 с, если разность концентраций на границе раздела фаз и в ядре потока равна единице.

Для установившихся процессов и неизменности коэффициента теплоотдачи закон Щукарева принимает форму

$$M = \beta (C_r - C_f) F$$

Закон массопроводности. Массопередача в системе с твердой фазой представляет особо сложный процесс, в котором, кроме массопередачи от поверхности раздела фаз в поток жидкости, имеет место и перемещение вещества в твердой фазе – массопроводность. К указанным процессам можно отнести процессы адсорбции, сушки и выщелачивания (извлечение вещества растворителем из пор твердого тела). Закон массопроводности заключается в следующем: количество вещества, переместившегося в твердой фазе за счет массопроводности, пропорционально градиенту концентраций, площади перпендикулярной направлению потока вещества, и времени:

$$dM = - K_m \frac{\partial C}{\partial x} dF d\tau,$$

где K_m – коэффициент массопроводности, по другому называемый коэффициентом «стесненной» диффузии, который можно определить по формуле Кади и Вильямса

$$K_m = \frac{D}{1 + m \frac{r}{R}},$$

где D – коэффициент молекулярной диффузии,

r – размер диффундирующих молекул;

R – поперечный размер пор твердого тела;

m – числовой коэффициент.

2.3.2.2. Шкалы оценивания результатов обучения на зачете

Оценка результатов обучения по дисциплине в форме уровня сформированности компонентов *знать, уметь и владеть* заявленных дисциплинарных компетенций проводится в режиме «зачтено» и «не зачтено».

Типовые шкала и критерии оценки результатов обучения при сдаче зачёта для компонентов *знать, уметь и владеть* приведены в общей части ФОС образовательной программы.

3. Критерии оценивания уровня сформированности компонентов и компетенций

3.1. Оценка уровня сформированности компонентов компетенций

При оценке уровня сформированности компетенций в рамках выборочного контроля при зачете считается, что *полученная оценка за компонент проверяемой в билете компетенции обобщается на соответствующий компонент всех компетенций, формируемых в рамках данной учебной дисциплины.*

Общая оценка уровня сформированности всех компетенций проводится путем агрегирования оценок, полученных студентом за каждый компонент формируемых компетенций, с учетом результатов текущего и рубежного контроля в виде интегральной оценки по 4-х балльной шкале. Все результаты контроля заносятся в оценочный лист и заполняются преподавателем по итогам промежуточной аттестации.

Форма оценочного листа и требования к его заполнению приведены в общей части ФОС образовательной программы.

При формировании итоговой оценки промежуточной аттестации в форме зачета используются типовые критерии, приведенные в общей части ФОС образовательной программы.