



**Негосударственное частное образовательное учреждение
высшего образования
«Технический университет УГМК»**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
ТЕПЛОФИЗИКА**

Направление подготовки **22.03.02 Металлургия**

Профиль подготовки **Металлургия цветных металлов**

Уровень высшего образования **Прикладной бакалавриат**

Рассмотрено на заседании кафедры Metallургии
Одобрено Методическим советом университета 30 июня 2021 г., протокол № 4

г. Верхняя Пышма
2021

Задания и методические указания к выполнению лабораторных работ составлены в соответствии с рабочей программой дисциплины «Теплофизика».

Код направления и уровня подготовки	Название направления	Реквизиты приказа Министерства образования и науки Российской Федерации об утверждении и вводе в действие ФГОС ВПО	
		Дата	Номер приказа
22.03.02	Металлургия	04.12.2015	1427

Автор – разработчик /Дата создания/	Гольцев В.А., к.т.н., доцент	
Эксперт	Скопов Геннадий Вениаминович, главный специалист Управления стратегического планирования ООО «УГМК- Холдинг», д-р техн. наук, ст.науч.сотр.	
Заведующий кафедрой «Металлургия» /Дата утверждения/	Мастюгин Сергей Аркадьевич, д-р техн. наук, доцент	
Продолжительность модуля/дисциплины	108 часов (3 ЗЕ)	
Место проведения	Учебные аудитории Технического университета УГМК	
Цель модуля/дисциплины	После завершения дисциплины, обучающиеся будут способны применять законы передачи теплоты и массы, механики жидкостей и газов для осуществления экспериментального и теоретического исследования тепловых, газо- и гидродинамических процессов в металлургических агрегатах.	

Лабораторные работы по дисциплине «Теплофизика» предусмотрены в объеме 28 часов (очная форма обучения) и в объеме 8 часов (заочная форма обучения). Цель лабораторных работ - закрепление теоретических знаний на практике под руководством преподавателя.

Лабораторные работы для очной формы обучения

Код раздела, темы	Номер работы	Наименование работы	Время на выполнение работы (час.)
P1	1	Пересчет состава топлива на рабочую массу, расчет теплоты сгорания топлива	2
P1	2	Определение показателей горения топлива, теоретической и балансовой температур горения	2
P2	3	Определение потерь давления на трение	2
P2	4	Определение потерь давления на местных сопротивлениях	2
P2	5	Исследование течения газов в трубах	2
P3	6	Исследование стационарной теплопроводности	4
P4	7	Конвективный теплообмен при течении газов в трубах	4
P5	8	Теплообмен излучением	4
P6	9	Теплопроводность при нестационарном режиме	2
P7	10	Теплопередача	4

Всего: 28

Лабораторные работы для заочной формы обучения

Код раздела, темы	Номер лабораторной работы	Тема лабораторной работы	Время на проведение (час.)
P4	7	Конвективный теплообмен при течении газов в трубах	4
P7	10	Теплопередача	4

Всего: 8

Методика выполнения работ

Лабораторная работа № 1

Пересчет состава топлива на рабочую массу, расчет теплоты сгорания топлива

Цель работы

1. Ознакомиться с общей характеристикой твердого, жидкого и газообразного топлива.
2. Располагая составом твердого (жидкого) топлива на органическую, горючую, сухую массу, пересчитать его состав на рабочую массу.
3. Располагая составом газообразного топлива на сухую массу, пересчитать его состав на рабочую массу с учетом влагосодержания.
4. В интегрированном пакете MS Excel разработать расчетную программу по пересчету любого вида топлива на рабочую массу.

Краткие сведения из теории

Характеристика твердого и жидкого топлива

Твердые и жидкие топлива представляют собой сложные соединения горючих элементов и балластных веществ, прежде всего минеральных примесей и влаги. Схема топливной макромолекулы приведена на рисунке 1. В ее составе можно выделить совокупность большого числа атомов углерода, водорода, азота, кислорода и серы, соединенных химическими связями. Минеральные примеси – оксиды и соли кремния, алюминия, железа – после сжигания топлива образуют золу. Влага содержится в топливе либо в свободном виде (т.е. ее можно удалить нагреванием до 100 °С), либо в химически связанном с минеральными примесями (гидратная, или пирогенетическая, разлагается при значительно более высокой температуре).

Для установления состава проводят технический и химический анализы топлива. Техническим анализом определяют содержание влаги, летучих веществ, золы в составе топлива. Химическим анализом выявляют содержание отдельных элементов без

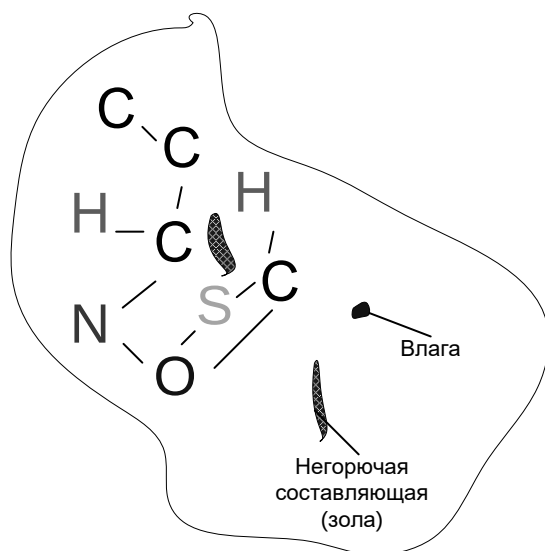


Рисунок 1 – Схематичное строение макромолекулы твердого и жидкого топлива

установления природы соединений, что позволяет получить элементарный (или поэлементный) состав. Данные для различных видов твердого и жидкого топлива как естественного, так и искусственного происхождения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Элементарный состав твердых и жидких топлив

Топливо	C^z	H^z	O^z	N^z	S^z	A^c	W^p
Нефть	83...88	11...14	0,1...1,3	0...1,7	0...5	0,1...0,3	1...1,5
Бензин	85	14,85	Следы	Следы	0,15	-	-
Мазут малосернистый	87,8	10,7	0,5	0,3	0,7	0,2	0...2
Мазут высокосернистый	84	11,5	0,2	0,3	4	0,3	0...2
Древесина	50	6	43	1	-	1...3	40...60
Уголь бурый	65...70	5...6	25	1	1...5	10...45	20...55
Уголь каменный	78...83	5...6	10...20	1	1...8	10...40	4...15
Кокс каменноугольный	92,4	0,7	0,9	1,1	0,7	0,4	3,8

Основные составляющие топливной макромолекулы, объединенные сложными химическими связями, формируют условную горючую массу (верхний индекс «г» в табл.1).

Углерод (C^z) - составляет основную часть топлива и находится как в свободном состоянии, так и в виде различных химических соединений. Содержание его изменяется от 50 % (в древесине) до 90 % (в коксе), а в жидком топливе на его долю приходится до 85...90 %. Таким образом, окисление этого элемента при сжигании твердого и жидкого топлива приносит наибольший вклад в процесс тепловыделения.

Водород (H^z) является вторым по значению горючим элементом топлива. В топливной макромолекуле представлен в виде соединений с кислородом, серой, углеродом. Связанный с кислородом, он не участвует в горении и является балластом топлива (это гидратная, или пирогенетическая влага). Содержание водорода в горючей массе твердых и жидких топлив колеблется от 1 до 15 %.

Кислород (O^z) и **азот (N^z)** в топливе являются балластом, так как их наличие снижает содержание основных горючих элементов (углерода и водорода). Кроме того, кислород, находясь в соединении с водородом или углеродом топлива, выводит их из процесса горения и уменьшает выделение теплоты при горении. Содержание кислорода велико в молодых видах твердого топлива – древесине и бурых углях. В жидком топливе содержание этого элемента относительно небольшое.

Азот при сжигании топлива при высокой температуре частично окисляется и переходит в продукты сгорания в виде оксидов, загрязняя атмосферу. Его содержание как в твердом, так и в жидком топливе невелико.

Сера (S^z) представлена в горючей массе топлива сложными высокомолекулярными органическими соединениями с углеродом, водородом и кислородом. Также она может находиться в виде соединений с железом и медью, это так называемая колчеданная сера. При горении топлива органическая и колчеданная сера окисляются с выделением теплоты. Однако образующиеся при сжигании серы оксиды весьма неблагоприятно влияют на окружающую среду, а также способствуют коррозии технологического оборудования. В металлургии попадание серы в металл снижает его качество.

Горючая масса и твердый негорючий остаток, называемый золой, формируют сухую массу твердого и жидкого топлива (верхний индекс «с», см. табл.1).

Зола (A^c) как составляющая сухой массы топлива представляет смесь негорючих минеральных соединений. Это силикаты, сульфиды, сульфаты, карбонаты, оксиды металлов, и другие неорганические соединения. Зола – нежелательная примесь в топливе, значительно снижающая его тепловую ценность (в особенности для различных углей, см. табл.1). Содержание золы в жидком топливе незначительно.

Сумма сухой массы топлива и общей влаги составляют рабочую массу, обычно используемую для практических расчетов. Для обозначения рабочей массы топлива используют верхний индекс «*p*» (см. табл.1).

Влага (W^p) в твердом и жидком топливе, как было сказано выше, складывается из свободной, или внешней, и химически связанной (пирогенетической). И та, и другая влага – балласт, снижающий энергетическую ценность, так как при сжигании на испарение внешней и разложение пирогенетической затрачивается определенное количество теплоты. Содержание внешней влаги зависит от условий хранения и транспортировки топлива и может быть снижено при грамотном осуществлении этих операций. Пирогенетическая влага твердого топлива присутствует в больших количествах в молодых (по геологическому возрасту) видах топлива – древесине, торфе, бурых углях (см. табл.1).

Таким образом, завершая рассмотрение технического и химического анализов твердого и жидкого топлива, запишем математические выражения для расчета. Состав горючей массы составит

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c = 100 \%,$$

сухой массы

$$C^c + H^c + O^c + N^c + S^c + A^c = 100 \%,$$

и, наконец, рабочей

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%.$$

Для выполнения теплотехнических расчетов необходимо осуществлять пересчет состава топлива с одной массы на другую. Для осуществления этой операции необходимо определить коэффициент пересчета, который приведен в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициенты для пересчета состава жидкого и твердого топлива из одной массы в другую

Заданная масса	Масса, на которую ведется пересчет		
	Горючая	Сухая	Рабочая
Горючая	1	$\frac{100 - A^c}{100}$	$\frac{100 - (A^p + W^p)}{100}$
Сухая	$\frac{100}{100 - A^c}$	1	$\frac{100 - W^p}{100}$
Рабочая	$\frac{100}{100 - (A^p + W^p)}$	$\frac{100}{100 - W^p}$	1

Для пересчета одной массы топлива в другую необходимо при помощи табл. 2 определить пересчетный коэффициент и умножить на него соответствующий компонент. В итоге любая масса топлива (горючая, сухая или рабочая) всегда будет составлять 100%.

Характеристика газообразного топлива

Газообразное топливо по своему составу представляет смесь различных газов, причем характеризуют его состав делением на горючие и негорючие компоненты. К горючим компонентам относят водород H_2 , оксид углерода CO , сероводород H_2S , метан CH_4 , высшие углеводороды C_mH_n . Негорючие компоненты газообразного топлива – это азот N_2 , диоксид углерода CO_2 , а также водяные пары H_2O . Некоторые виды газообразного топлива могут содержать и небольшое количество свободного кислорода O_2 .

Для газообразного топлива, как и для твердого и жидкого, принято выделять сухой и рабочий состав (с учетом влаги).

Состав сухого газообразного топлива (верхний индекс «*c*»):

$$CO^c + CO_2^c + CH_4^c + C_mH_n^c + H_2^c + O_2^c + N_2^c + \dots = 100 \%.$$

Для пересчета сухого состава газообразного топлива на рабочий обычно известно массовое содержание влаги в сухом газе $g_{в.л}^{с.с.}, \frac{г}{м^3}$. Поэтому вначале определяют

пересчетный коэффициент $k = \frac{100}{100 + 0,1244g_{в.л}^{с.с.}}$, а затем рассчитывают содержание водяных паров в топливе:

$$H_2O = 0,1244g_{в.л}^{с.с.}k, \%$$

Содержание остальных компонентов во влажном топливе (верхний индекс «вл») пересчитывают с использованием коэффициента по формуле

$$CO_2^{вл} = kCO_2^с; CO^{вл} = kCO^с \dots$$

Тогда рабочий состав влажного топлива можно записать в следующем виде:

$$CO^{вл} + CO_2^{вл} + CH_4^{вл} + C_mH_n^{вл} + H_2^{вл} + O_2^{вл} + N_2^{вл} + \dots H_2O = 100 \%$$

Характеризовать газообразное топливо лучше на сухой состав, так как содержание влаги в нем – величина переменная и зависит от ряда факторов: температуры, технологии добычи и транспортировки, технологии получения (для искусственных видов). Состав некоторых газообразных топлив приведен в таблице 3.

Таблица 3 – Химический состав естественных и искусственных газообразных топлив на сухую массу, % по объему

Топливо	CO	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C _m H _n	CO ₂	O ₂	N ₂
Природный газ Уренгойского месторождения	-	-	98,4	0,1	-	-	0,3	-	1,2
Попутный нефтяной газ	-	-	61,8	7,7	17,6	11,5	-	-	1,4
Коксовый газ	4,2...8,5	46...61	21...28	1,4...3,0	-	-	2,2...3,1	0,3...1,7	3,7...14
Доменный газ	27...30	1,5...2,5	-	0,1...0,4	-	-	10...12	-	56...58
Генераторный газ из каменного угля	26,5	13,5	2,5	0,4	-	-	5,0	0,2	51,9

Основным газообразным топливом в промышленности служит природный газ. Его месторождения сосредоточены в Западной Сибири (Уренгойское, Ямбургское месторождения, открытые в середине шестидесятых годов прошлого века), Восточной Сибири, на Камчатке, а также на шельфах Баренцева и Карского морей. В составе природного газа содержится главным образом метан и в небольшом количестве высшие углеводороды и балластные газы. Другой вид естественного газообразного топлива – попутный газ, добываемый совместно с нефтью. В его составе значительно больше высших углеводородов и меньше метана по сравнению с природным газом (см. табл. 3). Попутный нефтяной газ является ценным сырьем для химической промышленности, часть его используется для компенсации собственных затрат на нефтедобычу, но еще значительная часть сжигается в факелах, отравляя окружающую среду.

Выход искусственных газов связан с технологическими процессами (коксовый газ – продукт процесса коксования каменных углей, доменный – побочный продукт выплавки чугуна в доменных печах) либо с процессами термического разложения твердых топлив (генераторный газ). Эти виды топлива (см. табл. 3) имеют более низкую по сравнению с природным газом тепловую ценность из-за высокого содержания балластных примесей (исключение – коксовый газ). Поэтому их целесообразно использовать в местах получения (в частности, на металлургических комбинатах).

Теплота сгорания топлива

Одной из основных характеристик любого вида топлива служит теплота его сгорания. Окисляясь кислородом, горючие компоненты выделяют теплоту, балластные же, не принимая участие в процессе горения, нагреваются до температур, соответствующих конечным продуктам реакции окисления. Химический состав газообразного либо элементарный твердого и жидкого топлива не могут в полной мере охарактеризовать его тепловую ценность. Поэтому основной энергетической характеристикой любого вида топлива принято считать теплоту его сгорания.

Теплота сгорания характеризует количество теплоты, выделяющееся при полном сжигании единицы топлива. Для твердого и жидкого топлива за единицу принят один килограмм, для газообразного – один кубический метр при нормальных условиях (это давление 101324 Па и температура 273 К). Условием полного сжигания принимают те продукты реакции горения, которые не могут быть окислены до более высокого уровня (это CO_2 , H_2O и SO_2).

В продуктах горения любого топлива содержатся водяные пары. В зависимости от их агрегатного состояния в рабочем пространстве теплотехнического агрегата различают высшую Q_v и низшую Q_n теплоту сгорания. На рисунке 2 схематично представлено

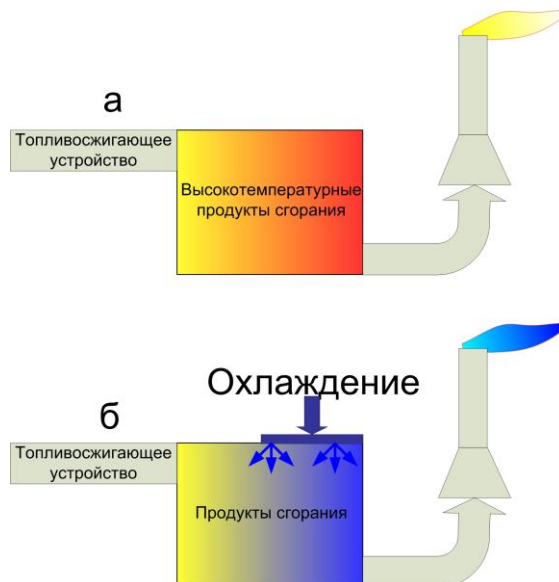


Рисунок 2 – Схема выделения низшей (а) и высшей (б) теплоты сгорания топлива

выделение низшей (а) и высшей (б) теплоты сгорания топлива в теплотехническом агрегате. В случае получения от топлива низшей теплоты сгорания продукты горения покидают рабочее пространство с температурой, превышающей точку росы, т.е. конденсации водяных паров там не происходит и теплота конденсации не выделяется. Такой случай характерен для большинства промышленных тепловых агрегатов. Однако, если продукты горения топлива принудительно охладить в пределах рабочего пространства до температуры ниже точки росы, при конденсации воды из водяных паров выделится теплота. Тогда при тепловой характеристике топлива речь пойдет о высшей теплоте сгорания.

При теплотехнических расчетах используют рабочий состав топлива с учетом влаги. Для твердого и жидкого топлива при его сжигании вся влага перейдет в продукты сгорания, и еще дополнительно выделится при окислении водорода. Теплота конденсации влаги составляет около 2500 кДж/кг, поэтому разница между высшей и низшей теплотой

сгорания для твердого и жидкого топлива при расчете на рабочую массу будет выражена следующим уравнением:

$$Q_g^p - Q_n^p = 2500 \times 0,01(9H^p + W^p), \text{ кДж/кг.}$$

При сжигании газообразного топлива водяные пары переходят в продукты сгорания из самого топлива, из воздуха (если он влажный) и образуются при сгорании водорода и углеводов. Разность высшей и низшей теплоты сгорания для газообразного топлива составит

$$Q_g^p - Q_n^p = 2010 \times 0,01(H_2O + H_2 + \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S), \text{ кДж/м}^3.$$

Определение теплоты сгорания топлива возможно как экспериментальным, так и расчетным путем. В эксперименте небольшую навеску топлива сжигают в атмосфере кислорода в установке, называемой калориметрической бомбой. По выделившемуся количеству теплоты определяют теплоту сгорания. Однако более доступен расчетный метод, для осуществления которого необходимо лишь знание элементарного состава для твердого и жидкого топлива и химического для газообразного.

Для твердого и жидкого топлива при определении низшей теплоты сгорания применяют формулу Д.И. Менделеева. Она получена суммированием теплового эффекта реакций окисления компонентов топлива:

$$Q_n^p = 339C^p + 1030H^p - 109(O^p - S^p) - 25W^p, \text{ кДж/кг.}$$

Для газообразного топлива формула для расчета низшей теплоты сгорания примет вид:

$$Q_n^p = 127,7CO + 108H_2 + 358CH_4 + 590C_2H_4 + 555C_2H_2 + 636C_2H_6 + \\ + 913C_3H_8 + 1185C_4H_{10} + 1465C_5H_{12} + 234H_2S, \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Для сравнения энергетической ценности различных видов топлива и удобства сравнительного анализа применения их на различных теплотехнических агрегатах введено понятие **условного топлива** (у.т.). Такого топлива в природе не существует, а выбранная

для его характеристики величина теплоты сгорания $Q_{y.m.} = 29300 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$ приблизительно равна теплоте сгорания качественного угля (антрацита). Для характеристики теплоты сгорания реального топлива по отношению к условному топливу применяют величину

теплового эквивалента топлива: $\mathcal{E}_m = \frac{Q_n^p}{Q_{y.m.}}$. Размерность этого показателя в зависимости от

агрегатного состояния топлив различная: для твердого и жидкого это кг у.т./кг, для газообразного кг у.т./м³. Теплота сгорания и тепловые эквиваленты некоторых видов топлив приведены ниже:

Топливо	Теплота сгорания, МДж/кг(м ³)	Тепловой эквивалент, кг у.т./кг(м ³)
Природный газ	32,0...41,0	1,09...1,40
Попутный нефтяной газ	16,0...63,0	0,55...2,15
Коксовый газ	16,0...18,0	0,55...0,61
Доменный газ	2,8...4,1	0,10...0,14
Мазут	39,0...41,0	1,33...1,40
Бурый уголь	13,0...16,5	0,44...0,56
Каменный уголь	16,8...28,0	0,57...0,96
Кокс	27,5	0,94

Анализируя данные таблицы, можно обозначить тесную связь элементарного и химического состава различных видов топлива с теплотой сгорания и тепловым

эквивалентом. Необходимо отметить также и весьма широкий диапазон изменения значений для отдельных видов топлива (к примеру, для попутных нефтяных газов). Объясняется это большим различием химического состава топлив в зависимости от месторождений, где они добываются.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. В интегрированном пакете MS Excel разработать расчетную программу по пересчету любого вида топлива на рабочую массу.
2. Располагая составом твердого (жидкого) топлива на сухую массу, с учетом известной величины W^p , осуществить пересчет на рабочую массу.
3. Для газообразного топлива рассчитать рабочий состав, располагая данными о массовом содержании влаги в сухом газе g , г/м³.
4. Состав топлив на рабочую массу рассчитать с точностью до двух знаков после запятой. Проанализировать изменение состава топлив, сделать выводы
5. В интегрированном пакете MS Excel разработать расчетную программу по определению теплоты сгорания топлива.
6. Располагая составом твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, рассчитать низшую теплоту сгорания в кДж/кг(м³).
7. Определить тепловой эквивалент заданного топлива.
8. Проанализировать влияние состава топлива на теплоту сгорания, сделать выводы

Варианты расчетных заданий:

Вариант № 1

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
94,63918	1,340206	1,134021	1,340206	1,134021	0,412371	3

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0,1	95,5	1	0,2	0	0	3,2	23

Вариант № 2

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
90,44118	2,731092	1,890756	1,995798	1,680672	1,260504	4,8

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0,1	94	1	0,2	0,5	1	3,2	23

Вариант № 3

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
88,55359	10,30177	0,208117	0,520291	0,312175	0,104058	3,9

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
-----------------	-----------------	-------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	----------------	---------------------

0,2	97,9	0	0	0,1	0	1,8	12
-----	------	---	---	-----	---	-----	----

Вариант № 4

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
89,79592	8,673469	0,408163	0,306122	0,510204	0,306122	2

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0,1	97,9	0,5	0,2	0,1	0	1,2	14

Вариант № 5

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
87,22966	10,91658	0,514933	0,411946	0,720906	0,205973	2,9

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0,1	98	0,4	0,2	0	0	1,3	16

Вариант № 6

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
88,68313	9,979424	0,308642	0,514403	0,411523	0,102881	2,8

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0,1	93,5	4	1	0,5	0,5	0,4	17

Вариант № 7

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
89,69072	8,865979	0,206186	0,309278	0,618557	0,309278	3

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0,1	95,5	1	0,2	0,1	0	3,1	23

Вариант № 8

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
87,57764	11,0766	0,414079	0,414079	0,310559	0,207039	3,4

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
3,8	42,4	12	20,5	7,2	3,1	11	8

Вариант № 9

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
89,9384	8,521561	0,513347	0,410678	0,513347	0,102669	2,6

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0,2	94	1,2	0,7	0,4	0,2	3,3	18

Вариант № 10

Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на сухую массу:

C ^c	H ^c	O ^c	N ^c	S ^c	A ^c	W ^p
88,94575	9,416581	0,307062	0,307062	0,716479	0,307062	2,3

Состав газообразного топлива на сухую массу:

CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	g, г/м ³
0	92,2	0,8	0	0,1	0	6,9	22

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Формулировку цели работы.
2. Краткие сведения из теории, основные расчетные формулы для перерасчета состава твердого (жидкого) и газообразного топлива на рабочую массу, основные формулы для расчет теплоты сгорания и теплового эквивалента твердого (жидкого) и газообразного топлива на рабочую массу..
3. Итоговую таблицу исходного (заданного) и конечного (рассчитанного) составов твердого (жидкого) и газообразного топлива.
4. Итоговую таблицу, содержащую результаты теплоты сгорания и теплового эквивалента для заданного топлива.
5. Фотографии экрана с программой MS Excel.
6. Выводы по работе.

Лабораторная работа № 2

Определение показателей горения топлива, теоретической и балансовой температур горения

Цель работы

1. В интегрированном пакете MS Excel разработать расчетную программу по определению показателей горения твердого (жидкого) топлива.
2. Располагая составом твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, рассчитать низшую теплоту сгорания в кДж/кг(м³).
3. Определить тепловой эквивалент заданного топлива.
4. Проанализировать влияние состава топлива на теплоту сгорания, сделать выводы

Краткие сведения из теории

Общие положения методики расчета горения топлива

Методика расчета процесса горения построена на основе законов сохранения массы и энергии и решения уравнений материального и теплового балансов. Состав топлива должен быть пересчитан на рабочие условия (с учетом влажности). Газообразное топливо и продукты сгорания приведены к нормальным условиям. Расчет горения включает:

- определение расхода окислителя (чистого кислорода, воздуха или дутья, обогащенного кислородом);
- нахождение количества и состава газообразных продуктов сгорания, образующихся в процессе горения;
- расчет теплоты сгорания топлива;
- определение температур горения.

Для окисления топлива при горении используют либо атмосферный воздух, либо воздух, дополнительно обогащенный кислородом. В некоторых технологических процессах для получения очень высоких температур применяют чистый кислород. Для расчетов процессов горения примем, что сухой атмосферный воздух содержит (по объему) 21% кислорода и 79% азота. Введем коэффициент k , характеризующий отношение азота к

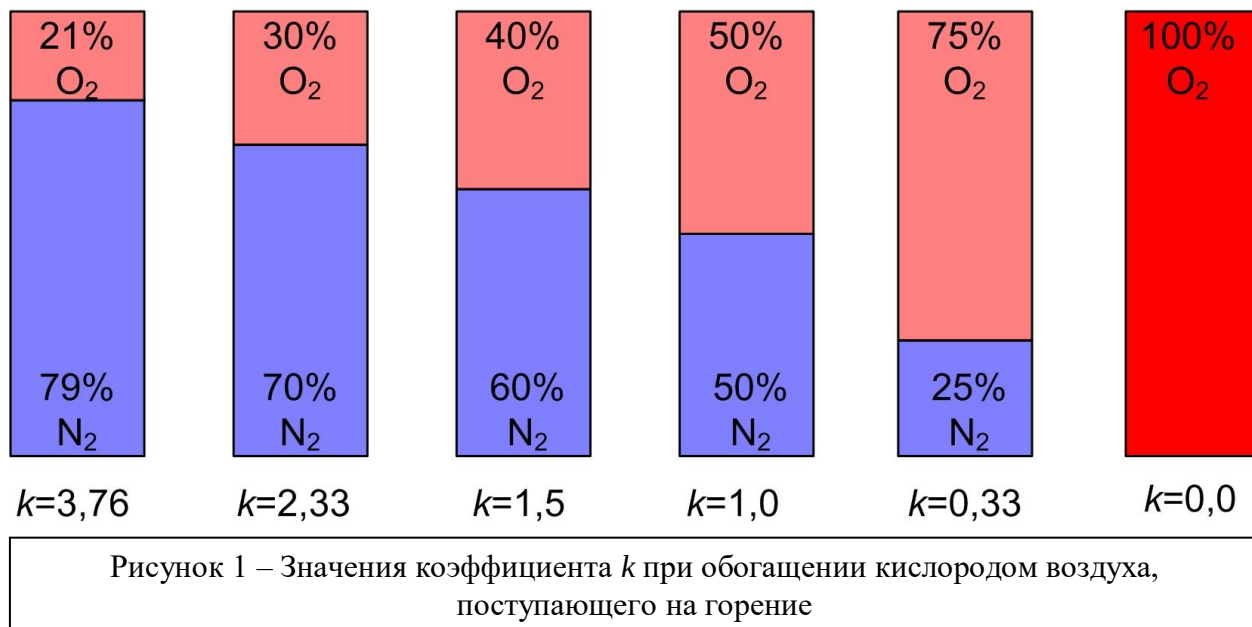
кислороду в окислителе $k = \frac{\%N_2}{\%O_2}$. Нетрудно рассчитать, что для атмосферного воздуха

$k = 3,76$. На рисунке 1 приведены значения коэффициента k при повышении содержания кислорода в воздушном дутье.

Воздух обычно содержит влагу. Для более точных расчетов процесса горения следует

учитывать величину абсолютной влажности $g_{вл}^{с.в.}, \frac{\Gamma}{\text{м}^3}$, которая в основном зависит от температуры.

При расчетах горения топлива выделяют теоретический расход воздуха $L_0, \text{м}^3/\text{кг}(\text{м}^3)$. Его определяют как объем сухого воздуха, необходимый для сжигания единицы топлива (одного килограмма твердого или жидкого или одного кубометра газообразного). Следует отметить, что эта величина вычисляется строго по стехиометрическим соотношениям между горючими компонентами топлива и окислителем.



Для обеспечения полного сжигания всех горючих компонентов на практике количество воздуха несколько увеличивают по сравнению с теоретически необходимым. Обозначим реальный (практический) расход воздуха как L_a , $m^3/kg(m^3)$.

Отношение $\alpha = \frac{L_a}{L_0}$ является важнейшим для характеристики процесса горения, а величина α получила название коэффициента расхода (избытка) воздуха.

Расчет процесса горения твердого и жидкого топлива

Прежде всего необходимо привести состав твердого и жидкого топлива к рабочей массе: $C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + A^p + W^p = 100 \%$.

Затем определяем объем чистого кислорода, необходимый для окисления всех горючих компонентов топлива. К примеру, для окисления одного моля углерода массой 12 кг потребуется 1 моль кислорода объемом 22,4 m^3 . Таким образом, на окисление 1 кг углерода необходимо будет затратить 22,4/12=1,867 кубических метра кислорода. Кислород содержится и в составе топливной макромолекулы, поэтому он может участвовать в реакции горения. Учитывая, что кроме углерода в топливе будет окислен водород и сера, определим потребное для этого количество кислорода:

$$V_{O_2} = 0,01(1,867C^p + 5,6H^p + 0,7S^p - 0,7O^p), \frac{m^3 O_2}{kg}$$

Для окисления 1 кг топлива потребуется сухого воздуха (с.в.) при $\alpha=1$ (при стехиометрическом соотношении):

$$L_0 = (1 + k)V_{O_2}, \frac{m^3 \text{с.в.}}{kg}$$

При сжигании топлива в практических условиях при $\alpha > 1$ расход сухого воздуха составит

$$L_a = \alpha L_0, \frac{m^3 \text{с.в.}}{kg}$$

Влажного воздуха (в.в.) с содержанием влаги $g_{в.л.}^{с.в.}, \frac{г}{m^3}$ при $\alpha=1$ и $\alpha > 1$ потребуется для окисления 1 кг твердого или жидкого топлива:

$$L_0^в = (1 + 0,001244g_{в.л.}^{с.в.})L_0, \frac{m^3 \text{в.в.}}{kg}; L_a^в = \alpha L_0^в, \frac{m^3 \text{в.в.}}{kg}$$

Определим выход продуктов сгорания от окисления всех горючих компонентов топлива при стехиометрическом соотношении (принимаем, что азот не принимает участия в процессах горения и переходит в продукты сгорания из топливной макромолекулы и воздуха):

$$V_0^{CO_2} = 0,01 \times 1,867 C^p, \frac{M^3 CO_2}{кг};$$

$$V_0^{SO_2} = 0,01 \times 0,7 S^p, \frac{M^3 SO_2}{кг};$$

$$V_0^{N_2} = 0,01 \times 0,8 N^p + 0,79 L_0, \frac{M^3 N_2}{кг};$$

$$V_0^{H_2O} = 0,01 \times 11,2 H^p + 0,01 \times 1,244 W^p + 0,001244 g_{в.л.}^{с.в.}, \frac{M^3 H_2O}{кг}.$$

Суммируя все компоненты, получим:

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{N_2} + V_0^{H_2O}.$$

Чтобы определить процентное содержание отдельных компонентов, воспользуемся простыми соотношениями:

$$H_2O = \frac{V_0^{H_2O}}{V_0} \times 100, \%; SO_2 = \frac{V_0^{SO_2}}{V_0} \times 100, \%; CO_2 = \frac{V_0^{CO_2}}{V_0} \times 100, \%; N_2 = \frac{V_0^{N_2}}{V_0} \times 100, \%.$$

Рассчитаем, каков будет выход продуктов сгорания при действительном ($\alpha > 1$) расходе окислителя. Не изменится выход диоксидов серы и углерода, больше будет азота и водяных паров и появится избыточный (непрореагировавший) кислород:

$$V_{\alpha}^{SO_2} = V_0^{SO_2} = 0,01 \times 0,7 S^p, \frac{M^3 SO_2}{кг};$$

$$V_{\alpha}^{CO_2} = V_0^{CO_2} = 0,01 \times 1,867 C^p, \frac{M^3 CO_2}{кг};$$

$$V_{\alpha}^{O_2} = (\alpha - 1) V_0^{O_2}, \frac{M^3 O_2}{кг};$$

$$V_{\alpha}^{N_2} = V_0^{N_2} + (\alpha - 1) \times 0,79 L_0, \frac{M^3 N_2}{кг};$$

$$V_{\alpha}^{H_2O} = V_0^{H_2O} + (\alpha - 1) \times 0,001244 g_{в.л.}^{с.в.} L_0, \frac{M^3 H_2O}{кг}.$$

В итоге после сложения всех компонентов получим:

$$V_{\alpha} = V_{\alpha}^{CO_2} + V_{\alpha}^{SO_2} + V_{\alpha}^{N_2} + V_{\alpha}^{H_2O} + V_{\alpha}^{O_2}, \frac{M^3}{кг}.$$

Состав продуктов горения для этих условий:

$$CO_2 = \frac{V_{\alpha}^{CO_2}}{V_{\alpha}} \times 100, \%; SO_2 = \frac{V_{\alpha}^{SO_2}}{V_{\alpha}} \times 100, \%; H_2O = \frac{V_{\alpha}^{H_2O}}{V_{\alpha}} \times 100, \%; N_2 = \frac{V_{\alpha}^{N_2}}{V_{\alpha}} \times 100, \%;$$

$$O_2 = \frac{V_{\alpha}^{O_2}}{V_{\alpha}} \times 100, \%.$$

Расчет процесса горения газообразного топлива

Приведем состав газообразного топлива к рабочему. Тогда с учетом влаги:

$$CO^{6.л.} + CO_2^{6.л.} + CH_4^{6.л.} + C_m H_n^{6.л.} + H_2^{6.л.} + O_2^{6.л.} + N_2^{6.л.} + \dots + H_2O = 100\%.$$

Затем определяем объем чистого кислорода, необходимый для окисления всех горючих компонентов топлива. К примеру, для окисления одного моля метана потребуется 2 моля кислорода, а такого же объема оксида углерода всего 0,5 моля. Учитывая эти соотношения,

можно записать формулу для расчета объема кислорода, потребного для полного сжигания всех горючих компонентов газообразного топлива:

$$V_{O_2} = 0,01 \times [0,5CO^{г.л} + 0,5H_2^{г.л} + 1,5H_2S^{г.л} + (m + \frac{n}{4})C_mH_n^{г.л} - O_2^{г.л}], \frac{м^3 O_2}{м^3}.$$

Сухого воздуха (с.в.) при $\alpha=1$ (при стехиометрическом соотношении) потребуется для окисления одного кубического метра газообразного топлива:

$$L_0 = (1+k)V_{O_2}, \frac{м^3 \text{с.в.}}{м^3}.$$

Для практического расхода сухого воздуха запишем

$$L_\alpha = \alpha L_0, \frac{м^3 \text{с.в.}}{м^3}.$$

Влажного воздуха с содержанием влаги $g_{г.л}^{с.в.}, \frac{г}{м^3}$ при $\alpha=1$ и $\alpha>1$ потребуется для окисления 1 кубометра топлива:

$$L_0^в = (1 + 0,001244g_{г.л}^{с.в.})L_0, \frac{м^3 \text{в.в.}}{м^3}; L_\alpha^в = \alpha L_0^в, \frac{м^3 \text{в.в.}}{м^3}.$$

Определим выход продуктов сгорания газообразного топлива при стехиометрических соотношениях ($\alpha=1$):

$$V_0^{CO_2} = 0,01 \times (CO_2^{г.л} + CO^{г.л} + CH_4^{г.л} + mC_mH_n^{г.л}), \frac{м^3 CO_2}{м^3};$$

$$V_0^{SO_2} = 0,01 \times (SO_2^{г.л} + H_2S^{г.л}), \frac{м^3 SO_2}{м^3};$$

$$V_0^{N_2} = 0,01 \times N_2^{г.л} + kV_{O_2}, \frac{м^3 N_2}{м^3};$$

$$V_0^{H_2O} = 0,01 \times (H_2O^{г.л} + H_2^{г.л} + H_2S^{г.л} + \frac{n}{2}C_mH_n^{г.л}) + 0,001244g_{г.л}^{с.в.}L_0, \frac{м^3 H_2O}{м^3}.$$

Суммируя все компоненты, получим:

$$V_0 = V_0^{CO_2} + V_0^{SO_2} + V_0^{N_2} + V_0^{H_2O}.$$

Чтобы определить процентное содержание отдельных компонентов, воспользуемся простыми соотношениями:

$$H_2O = \frac{V_0^{H_2O}}{V_0} \times 100, \%; SO_2 = \frac{V_0^{SO_2}}{V_0} \times 100, \%; CO_2 = \frac{V_0^{CO_2}}{V_0} \times 100, \%; N_2 = \frac{V_0^{N_2}}{V_0} \times 100, \%.$$

Рассчитаем, каков будет выход продуктов сгорания при действительном ($\alpha>1$) расходе окислителя. Не изменится выход диоксидов серы и углерода, больше будет азота и водяных паров и появится избыточный (непрореагировавший) кислород:

$$V_\alpha^{CO_2} = 0,01 \times (CO_2^{г.л} + CO^{г.л} + CH_4^{г.л} + mC_mH_n^{г.л}), \frac{м^3 CO_2}{м^3};$$

$$V_\alpha^{SO_2} = 0,01 \times (SO_2^{г.л} + H_2S^{г.л}), \frac{м^3 SO_2}{м^3};$$

$$V_\alpha^{N_2} = V_0^{N_2} + (\alpha-1)kV_{O_2}, \frac{м^3 N_2}{м^3};$$

$$V_\alpha^{O_2} = (\alpha-1)V_{O_2}, \frac{м^3 O_2}{м^3};$$

$$V_\alpha^{H_2O} = V_0^{H_2O} + (\alpha-1) \times 0,001244g_{г.л}^{с.в.}L_0, \frac{м^3 H_2O}{м^3}.$$

Суммируя все компоненты, получим

$$V_a = V_a^{CO_2} + V_a^{SO_2} + V_a^{N_2} + V_a^{H_2O}.$$

Состав продуктов горения для этих условий:

$$CO_2 = \frac{V_a^{CO_2}}{V_a} \times 100, \%; SO_2 = \frac{V_a^{SO_2}}{V_a} \times 100, \%; H_2O = \frac{V_a^{H_2O}}{V_a} \times 100, \%; N_2 = \frac{V_a^{N_2}}{V_a} \times 100, \%;$$

$$O_2 = \frac{V_a^{N_2}}{V_a} \times 100, \%.$$

Определение температур горения топлива

Определение температур горения производят на основе анализа теплового баланса процесса горения.

Выделяют теоретическую температуру горения $t_0^m, ^\circ C$ (при $\alpha=1$) и $t_a^m, ^\circ C$ (при $\alpha>1$).

Она достижима только при условиях отсутствия теплообмена камеры горения с окружающей средой при учете физической теплоты, вносимой подогретым воздухом (Q_6) и топливом (Q_m). В теоретической температуре горения учитывают потери теплоты вследствие высокотемпературной диссоциации продуктов сгорания. При высоких температурах (свыше $1800^\circ C$) имеет место эндотермическая реакция диссоциации CO_2 и H_2O , достигающая значительных значений только при чрезвычайно высоких температурах. На практике учитывают потерю $Q_3^{дисс}$ как процент от Q_n^p .

Итак, с учетом заданного значения ($Q_3^{дисс}$) теоретическую температуру горения можно определить по формулам:

$$t_0^m = \frac{Q_n^p + Q_6 + Q_m - Q_3^{дисс}}{V_0 c_2}, ^\circ C; t_a^m = \frac{Q_n^p + Q_6 + Q_m - Q_3^{дисс}}{V_a c_2}, ^\circ C.$$

Сложность расчета теоретической температуры по формулам, приведенным выше, заключается в определении удельной теплоемкости продуктов сгорания c_2 , которая также зависит от температуры, и в расчет должна быть взята при температуре, которая неизвестна.

Выделяют балансовую температуру горения $t_0^\delta, ^\circ C$ (при $\alpha=1$) и $t_a^\delta, ^\circ C$ ($\alpha>1$).

Она достижима только при условиях отсутствия теплообмена камеры горения с окружающей средой при учете физической теплоты, вносимой подогретым воздухом (Q_6) и топливом (Q_m). В теоретической температуре горения учитывают потери теплоты вследствие химического и механического недожога ($Q_3 + Q_4$). При определении балансовой температуры учитывают недожог всех видов: химический Q_3 вследствие высокотемпературной диссоциации продуктов сгорания, а также вызванный плохим перемешиванием топлива и окислителя (диффузионными затруднениями), и механический Q_4 , характерный для сжигания только твердого и жидкого топлива, когда несгоревшие частицы обнаруживают в продуктах сгорания в твердом виде.

Итак, с учетом заданного значения ($Q_3 + Q_4$) химического и механического недожога теоретическую температуру горения можно определить по формулам:

$$t_0^\delta = \frac{Q_n^p + Q_6 + Q_m - (Q_3 + Q_4)}{V_0 c_2}, ^\circ C; t_a^\delta = \frac{Q_n^p + Q_6 + Q_m - (Q_3 + Q_4)}{V_a c_2}, ^\circ C.$$

При определении балансовой температуры, как и при расчете теоретической, сложность состоит в установлении значений удельной теплоемкости продуктов сгорания c_2 , зависящей от искомой величины.

Инженерный метод определения теоретической и балансовой температур горения предполагает определение теплосодержания продуктов горения с учетом физической

теплоты, вносимой подогретым воздухом и топливом, и потерь с химическим и механическим недожогом.

При отыскании теоретических температур горения суммируют теплосодержание при

генерации химической энергии топлива $i_x = \frac{Q_p}{V_a}$, $i_x = \frac{Q_p}{V_0}$, при подогреве воздуха

$i_g = \frac{L_a(L_a^g)c_g t_g}{V_a}$, $i_g = \frac{L_0(L_0^g)c_g t_g}{V_0}$ и топлива и потерь с химическим и механическим

недожогом:

$$i^m = i_x + i_g + i_m - i_3^{\text{дож}}; i^{\delta} = i_x + i_g + i_m - (i_3 + i_4).$$

Инженерным методом предполагается с использованием специальных диаграмм (рисунок 2), построенных для различных видов топлива, и с учетом содержания избыточного воздуха в продуктах сгорания (если величина $\alpha > 1$) $V_L = 100(L_a - L_0)/V_a$, определять теоретическую и балансовую температуры.

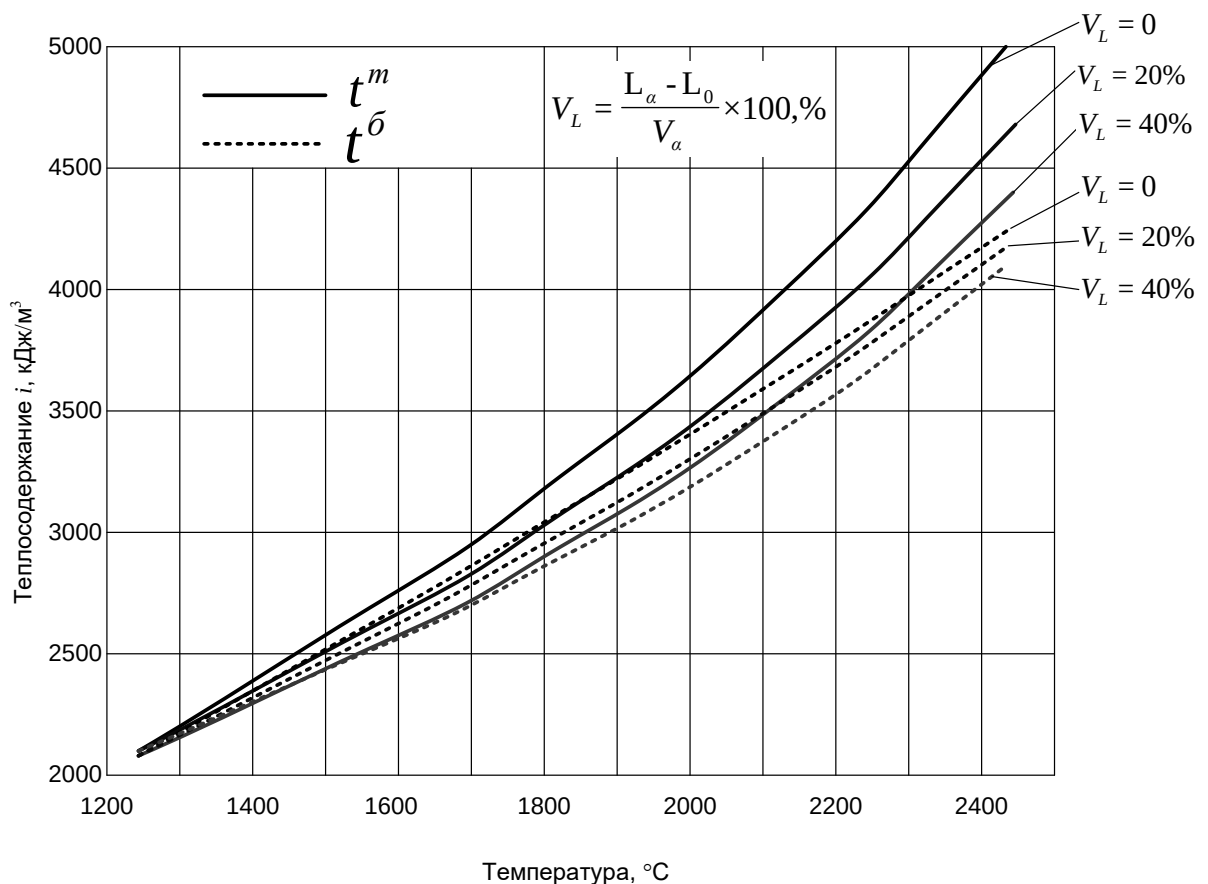


Рисунок 2 – i - t диаграмма для газов и газовых смесей при $Q_p > 12500 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3}$

Порядок выполнения лабораторной работы

Располагая составом твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, при известном коэффициенте расхода воздуха α и его влажности $g_{\text{вл}}^{\text{с.в.}}$, $\frac{\Gamma}{\text{м}^3}$ необходимо определить следующие показатели процесса горения.

1. Сколько потребуется кислорода V_{O_2} и воздуха L_a^g для окисления единицы топлива?

2. Каков будет общий выход продуктов сгорания V_a и их состав?

Результаты расчета привести с точностью до 2 знаков после запятой.

Вариант № 1

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1, 21$. Влажность воздуха $g_{вл}^{с.б.}=15$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, %:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
91,80	1,30	1,10	1,30	1,10	0,40	3,00

Вариант № 2

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1, 16$. Влажность воздуха $g_{вл}^{с.б.}=11$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, %:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
86,10	2,60	1,80	1,90	1,60	1,20	4,80

Вариант № 3

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1, 11$. Влажность воздуха $g_{вл}^{с.б.}=12$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, %:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
85,10	9,90	0,20	0,50	0,30	0,10	3,90

Вариант № 4

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1, 14$. Влажность воздуха $g_{вл}^{с.б.}=13$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, %:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
88,00	8,50	0,40	0,30	0,50	0,30	2,00

Вариант № 5

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1, 18$. Влажность воздуха $g_{вл}^{с.б.}=10$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, %:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
84,70	10,60	0,50	0,40	0,70	0,20	2,90

Вариант № 6

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1, 22$. Влажность воздуха $g_{вл}^{с.б.}=19$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, %:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
86,20	9,70	0,30	0,50	0,40	0,10	2,80

Вариант № 7

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1, 28$. Влажность воздуха $g_{вл}^{с.б.}=20$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу, %:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
87,00	8,60	0,20	0,30	0,60	0,30	3,00

Вариант № 8

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1,16$. Влажность воздуха $g_{в.л.}^{с.в.}=13$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу,%:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
84,60	10,70	0,40	0,40	0,30	0,20	3,40

Вариант № 9

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1,24$. Влажность воздуха $g_{в.л.}^{с.в.}=22$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу,%:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
87,60	8,30	0,50	0,40	0,50	0,10	2,60

Вариант № 10

Коэффициент расхода воздуха $\alpha=1,19$. Влажность воздуха $g_{в.л.}^{с.в.}=11$ г/м³. Элементарный состав твердого (жидкого) топлива на рабочую массу,%:

C ^p	H ^p	O ^p	N ^p	S ^p	A ^p	W ^p
86,90	9,20	0,30	0,30	0,70	0,30	2,30

Располагая составом газообразного топлива на рабочую массу, при известном коэффициенте расхода воздуха α и его влажности $g_{в.л.}^{с.в.}, \frac{\Gamma}{\text{м}^3}$ необходимо определить следующие показатели.

1. Сколько потребуется кислорода $V_{o_2}, \text{м}^3/\text{м}^3$ и влажного воздуха $L_{\alpha}^e, \text{м}^3/\text{м}^3$ для окисления единицы (одного кубического метра) топлива?
2. Каков будет общий выход продуктов сгорания $V_{\alpha}, \text{м}^3/\text{м}^3$ и их состав?
3. Чему равно балансовое теплосодержание продуктов сгорания, если задана температура подогрева воздуха $t_{в.}$, а химический недожог составит 2% от величины низшей рабочей теплоты сгорания?

При расчетах принять теплоемкость воздуха $c=1,31$ кДж/(м³·К), а температуру сжигаемого топлива равной 0°С.

Результаты расчета привести с точностью до 2 знаков после запятой.

Таблица вариантов исходных данных для расчета горения топлива

№ вар.	Состав топлива на рабочую массу, %								Коэффициент расхода воздуха α , д.ед.	Влажность воздуха $g_{вл}^{с.в.}, \frac{\Gamma}{\text{м}^3}$	Температура подогрева воздуха, °С
	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	N ₂	H ₂ O			
									1,08	22	150
1	0,1	92,85	0,97	0,19	0	0	3,11	2,78	1,05	13	170
2	0,1	91,39	0,97	0,19	0,49	0,97	3,11	2,78	1,03	25	190
3	0,2	96,46	0	0	0,1	0	1,77	1,47	1,11	19	210
4	0,1	96,22	0,49	0,2	0,1	0	1,18	1,71	1,04	24	230
5	0,1	96,09	0,39	0,2	0	0	1,27	1,95	1,12	18	250
6	0,1	91,56	3,92	0,98	0,49	0,49	0,39	2,07	1,09	17	270
7	0,1	90	2,13	1,19	0,1	0,69	3,01	2,78	1,12	19	290
8	3,76	41,98	11,88	20,3	7,13	3,07	10,89	0,99	1,15	17	310
9	0,2	91,94	1,17	0,68	0,39	0,2	3,23	2,19	1,14	23	330
10	0	89,74	0,78	0	0,1	0	6,72	2,66	1,23	14	320
11	1	95	0,5	0,19	0,11	0	1	2,2	1,16	15	300
12	0,15	92,11	0,97	1,12	0,49	1,27	1,11	2,78	1,09	22	280
13	0,2	88	2,56	4,52	0,1	1,38	1,77	1,47	1,18	32	260
14	0,22	92,14	0,49	0,56	0,28	4,15	0,45	1,71	1,07	28	240
15	0,18	94,12	0,39	0,2	1,18	0,71	1,27	1,95	1,11	17	220
16	0,1	66	12	13,9	4,18	0,53	0,39	2,9	1,12	25	200
17	0,13	88	4,1	1,19	0,1	0,69	3,01	2,78	1,07	16	180
18	0,56	55,1	11,88	13,58	4,58	2,59	10	1,71	1,21	27	160
19	1,15	89	4,1	3,12	0,39	0,2	0,11	1,93	1,12	19	140
20	0,38	88,7	3,78	1,15	0,59	1,14	1,45	2,81	1,08	22	150

Содержание отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Формулировку цели работы.
2. Краткие сведения из теории, основные расчетные формулы для расчета показателей процесса горения и температур при сжигании топлива.
3. Итоговую таблицу, содержащую результаты расчетов для заданного топлива.
4. Фотографии экрана с программой MS Excel.
5. Выводы по работе.

Виртуальная лабораторная работа № 3

Определение потерь давления на трение

Цель работы

Целью работы является определение коэффициентов потерь напора на трение в трубах, имеющих различную шероховатость, а также изучение влияния режима движения на коэффициент потерь напора на трение.

Краткие сведения из теории

Движение газов по прямолинейным участкам труб и каналов всегда сопровождается потерями энергии на преодоление сопротивлений. Величина этих потерь характеризуется коэффициентом потерь напора на трение – λ .

Физика процесса потери энергии определяется режимом движения. При ламинарном режиме потери обусловлены силами внутреннего трения (вязкостью), появляющимися при перемещении одного слоя жидкости или газа относительно другого. Энергия в этом случае тратится на разрыв связей между молекулами. Поскольку силы вязкости пропорциональны скорости потока в первой степени, а изменения скорости по сечению потока значительны, то на преодоление этих сил при ламинарном режиме движения тратится значительно больше энергии, чем на трение о стенки, в силу того, что скорости вблизи стенок оказываются очень маленькими, а пограничный слой имеет толщину большую, чем высота бугорков шероховатости. Поэтому при ламинарном режиме движения шероховатость практически не оказывает влияния на потери энергии потока при его движении по трубам и каналам, а коэффициент потери напора на трение зависит только от числа Рейнольдса :

$$Re = \frac{WD}{\nu}, \quad (1)$$

где W – средняя по сечению скорость потока в трубе, м/с; D – определяющий размер (внутренний диаметр трубы), м; ν – коэффициент кинематической вязкости (кинематический коэффициент вязкости), м²/с.

При увеличении числа Рейнольдса начинают преобладать силы инерции, пропорциональные квадрату скорости. При этом возникает турбулентное движение, характеризующееся появлением поперечных составляющих скорости и связанного с этим перемещением жидкости (газа) в направлении, нормальном к направлению скорости. При турбулентном режиме потери энергии, обусловленные обменом количеством движения беспорядочно движущихся микрообъемов среды (турбулентных вихрей), становятся во много раз больше, чем при ламинарном. Вместе с тем при ламинарном течении значение λ оказывается больше, чем при турбулентном. Это объясняется тем, что коэффициент потерь на трение определяется как отношение потерь давления, пропорциональных первой степени скорости, к скоростному напору, который пропорционален квадрату скорости.

$$\lambda = \frac{\Delta H_{тр}}{\frac{l}{D} \frac{\rho W^2}{2}}, \quad (2)$$

где $\Delta H_{тр}$ – потери давления на участке трубопровода, Па; l – длина участка трубопровода, м.

В случае шероховатой поверхности стенок пограничный слой становится сопоставим по толщине с размерами бугорков шероховатости. Обтекание выступов при возросшей скорости происходит с отрывом, т.е. с образованием вихрей, и коэффициент потерь начинает зависеть не только от числа Рейнольдса, но и от относительной шероховатости стенки:

$$\bar{\Delta} = \frac{\Delta}{D}, \quad (3)$$

где Δ – средняя высота выступов шероховатости стенок канала, м.

В турбулентном же режиме обтекание потоком бугорков шероховатости не приводит к увеличению уровня турбулентности потока, поскольку толщина пограничного слоя становится пренебрежимо малой по сравнению с высотой бугорков шероховатости.

Результаты опытов Д. Никурадзе, изучавшего влияние режима движения на коэффициент потерь напора на трение в трубах с равномерной шероховатостью, показаны на рисунке 1 в виде графика. На этом графике выделяют три области с различными по характеру зависимостями λ от режима движения. *Первая область* относится к малым значениям чисел Re (до $Re = 2000$), т. е. к ламинарному режиму движения, и характеризуется тем, что шероховатость не оказывает никакого влияния на коэффициент потерь напора на трение. Зависимость λ от режима движения в этой области чисел Рейнольдса подчиняется закону Гагена–Пуазейля:

$$\lambda = \frac{64}{Re}. \quad (4)$$

Во второй, так называемой переходной между ламинарным и турбулентным течением области ($Re = 2000 \dots 4000$), коэффициент потерь напора на трение сначала быстро растет с увеличением числа Рейнольдса, оставаясь при этом одинаковым для труб с различной шероховатостью, а затем, вследствие усиливающегося влияния относительной шероховатости на коэффициент потерь, кривые для труб с разной шероховатостью начинают расходиться и перестают подчиняться зависимости, полученной Блазиусом для гладких труб:

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (5)$$

Таким образом, во второй области на коэффициент потерь влияют и режим движения – (Re) и относительная шероховатость – ($\bar{\Delta}$).

Третья область характеризуется развитым турбулентным течением. В ней потери энергии практически перестают зависеть от режима движения и зависят только от относительной шероховатости внутренней поверхности канала.

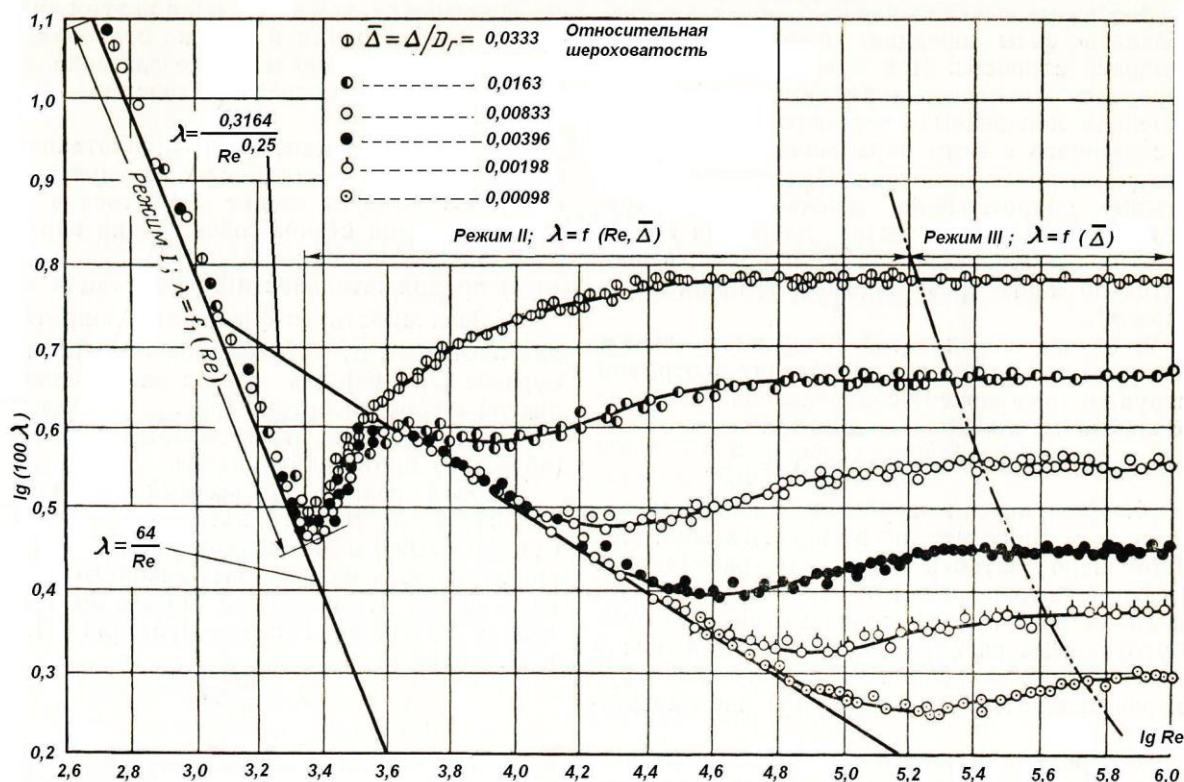


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента потери напора на трение λ от Re для труб с равномерно-зернистой шероховатостью (график Никурадзе)

Описание виртуальной лабораторной установки

Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки показана на рисунке 2. Основным элементом установки является трасса для движения воздуха 2 с установленными виртуальными приборами для измерения статического давления (результаты измерений приводятся в Па). Расход воздуха, подаваемый в трассу, регулируют кнопкой на панели управления вентилятора 1. На панели вентилятора также отображается расход воздуха ($\text{м}^3/\text{час}$), его давление (Па) и число оборотов рабочего колеса.

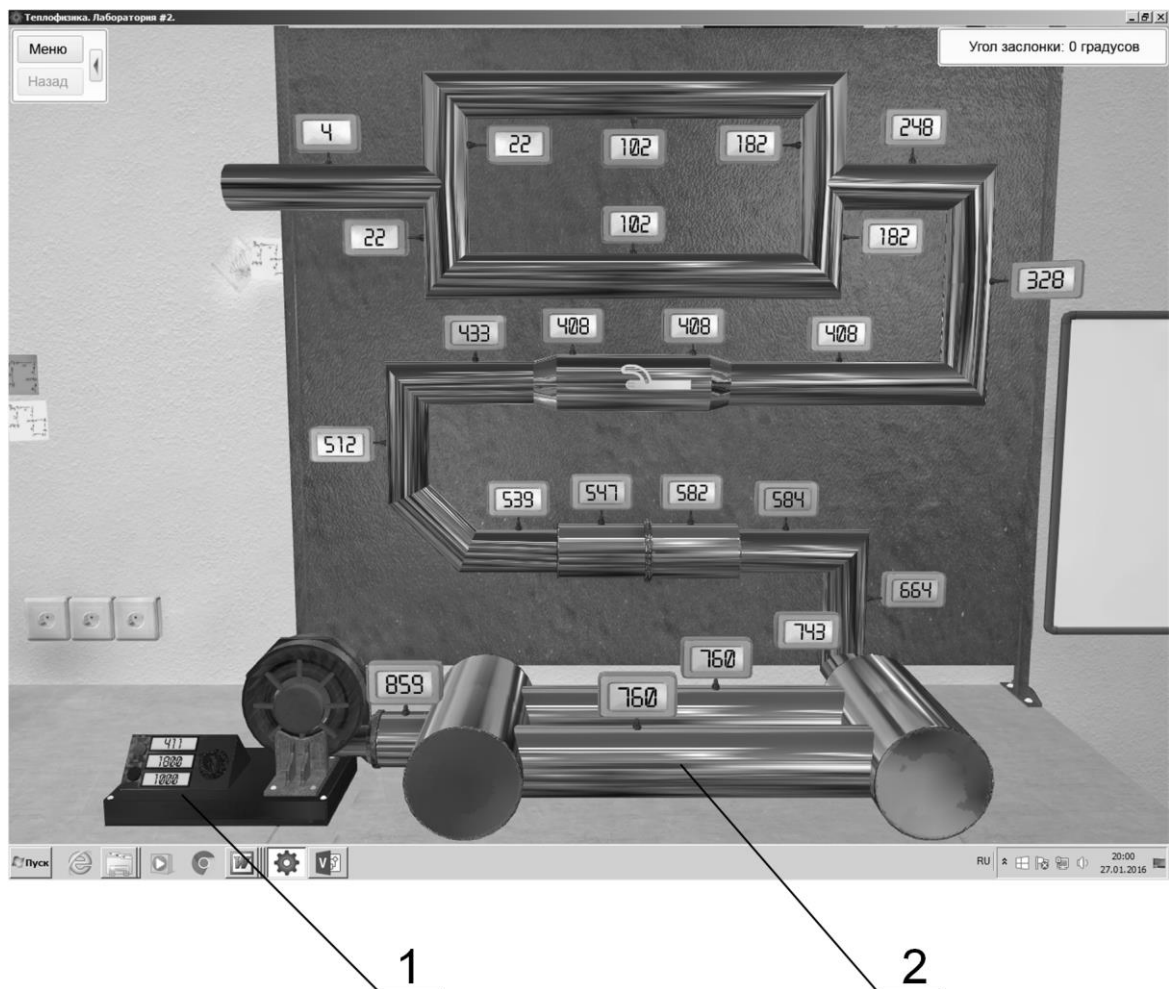


Рисунок 2 – Схема виртуальной лабораторной установки

Порядок подготовки и выполнения виртуального эксперимента

1. Ознакомиться с заданием на выполнение эксперимента, записать диаметры труб трассы.
2. С помощью кнопки на панели управления вентилятором 1 (см. рис. 2) включить его и установить заданный преподавателем расход воздуха.
3. Для выбранного элемента трассы записать статические давления, отображаемые на виртуальных приборах.
4. При помощи клавиши клавиатуры Print Screen сфотографировать экран.

Обработка результатов

Все результаты измерений и последующих расчётов записывают в таблицу:

Величина		Участок №		
		1	2	3
Расход	$V_t, \text{м}^3/\text{с}$			
Площадь сечения трубы	$\omega, \text{м}^2$			
Скорость	$W, \text{м/с}$			
Статическое давление	Вход $P'_{ст}, \text{Па}$			
	Выход $P''_{ст}, \text{Па}$			
Потери статического давления в трубе	$\Delta P = P'_{ст} - P''_{ст}, \text{Па}$			
Коэффициент потерь давления на трение	λ			

Значение λ рассчитывают с использованием формулы (2), которая после небольших преобразований примет вид

$$\lambda = \frac{D}{l} \frac{\Delta P}{P_{дин}}. \quad (6)$$

Если коэффициент потерь напора на трение $\lambda \geq 0,03$, то значение относительной шероховатости можно рассчитать по формуле

$$\bar{\Delta} = \left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^4 \frac{68}{\text{Re}}. \quad (7)$$

Для того чтобы сопоставить полученные экспериментальные результаты с приведёнными на графике Никурадзе, необходимо определить режим движения потока воздуха в исследуемой трубе, рассчитав число подобия Рейнольдса по формуле (1). Если окажется, что режим движения был ламинарным ($\text{Re} \leq 2000$), то коэффициент потерь напора на трение, определенный по формуле (6), сравнивают со значением λ , рассчитанным по формуле Гагена–Пуазейля (4). Если режим движения переходный ($2000 \leq \text{Re} \leq 4000$), то значение λ , полученное экспериментальным путём, сравнивают с рассчитанным по формуле Блазиуса (5). При этом надо иметь в виду, что формула Блазиуса выведена для гладких труб с относительной шероховатостью $\bar{\Delta} \leq 0,03$.

Содержание отчета по лабораторной работе

В отчёт должны быть включены следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

Виртуальная лабораторная работа № 4

Определение потерь давления на местных сопротивлениях

Цель работы

Целью работы является экспериментальное определение численных значений коэффициентов местных сопротивлений, встречающихся на пути воздушного потока при различных скоростях его движения, и сопоставление полученных результатов со значениями, рассчитанными по теоретическим формулам.

Краткие сведения из теории

Под местными сопротивлениями принято понимать участок трубопровода (канала), на котором происходит либо изменение направления движения среды, либо формы или сечения трубопровода. К местным сопротивлениям следует относить повороты газопроводов, их расширения или сужения, разветвление или слияние потоков, протекание потока через сетки, решётки, дроссельные и запорные устройства, обтекание препятствий и т. п. При прохождении потоком таких участков, вследствие отрыва потока от стенок и вихреобразования в местах изменения конфигурации трубопровода, происходят необратимые потери механической энергии, которая переходит в тепловую. Потери энергии обуславливаются молекулярной и турбулентной вязкостью движущейся среды.

Потери напора на конкретном местном сопротивлении (ΔP) могут быть рассчитаны по формуле

$$\Delta P = \zeta \frac{W^2}{2} \rho, \quad (1)$$

где ζ – табличное значение коэффициента местного сопротивления; W – средняя действительная скорость движения воздушного потока, м/с; ρ – действительная плотность воздуха (при температуре и атмосферном давлении в лаборатории), кг/м³.

Абсолютная величина потерь напора на местном сопротивлении зависит от скорости движения потока и свойств среды, поэтому в инженерных расчётах используют безразмерный коэффициент гидравлического сопротивления, весьма удобный тем, что в динамически и геометрически подобных потоках он имеет одно и то же значение независимо от рода жидкости или газа, скорости потока и определяющих размеров рассматриваемых участков.

Коэффициент местного сопротивления представляет собой отношение потерь напора на данном местном сопротивлении к динамическому напору, взятому до местного сопротивления (за исключением случая сужения потока).

$$\zeta = \frac{\Delta P}{P_{\text{дин}}}. \quad (2)$$

Значения коэффициентов местных сопротивлений для конкретных случаев могут быть найдены в справочной литературе. Поскольку коэффициенты местных сопротивлений не зависят от рода среды, протекающей по каналу, а определяются главным образом геометрическими характеристиками рассматриваемого элемента сети, то данные, приведённые в справочниках, в одинаковой степени пригодны как для расчёта сопротивлений гидравлических сетей, так и для расчёта газовых, воздушных и других сетей и аппаратов.

Экспериментально коэффициент местного сопротивления можно определить, используя уравнение Бернулли:

$$P'_{\text{ст.}} + P'_{\text{дин.}} = P''_{\text{ст.}} + P''_{\text{дин.}} + \Delta P, \quad (3)$$

где $P'_{\text{ст.}}, P'_{\text{дин.}}$ – статический и динамический напоры до местного сопротивления, Па; $P''_{\text{ст.}}, P''_{\text{дин.}}$ – то же, но после этого сопротивления, Па.

В приведённом уравнении Бернулли не учтён геометрический напор, который отсутствует в потоке воздуха, имеющего температуру окружающей среды.

Используя формулу (3), можно рассчитать полную потерю напора на местном сопротивлении, Па;

$$\Delta P = (P'_{\text{ст.}} + P'_{\text{дин.}}) - (P''_{\text{ст.}} + P''_{\text{дин.}}), \quad (4)$$

а зная эти потери, можно определить коэффициент местного сопротивления по формуле (2):

$$\zeta = \frac{\Delta P}{P'_{\text{дин.}}}$$

Для случая сужения потока эта формула примет вид

$$\zeta = \frac{\Delta P}{P''_{\text{дин.}}}$$

Необходимо отметить, что статические напоры определяют непосредственным измерением до и после местного сопротивления, а динамические – рассчитывают.

Описание виртуальной лабораторной установки

Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки показана на рисунке. Основным элементом установки является трасса для движения воздуха 2 с установленными виртуальными приборами для измерения статического давления (результаты измерений приводятся в Па). Расход воздуха, подаваемый в трассу, регулируют кнопкой на панели управления вентилятора 1. На панели вентилятора также отображается расход воздуха (м³/час), его давление (Па) и число оборотов рабочего колеса.

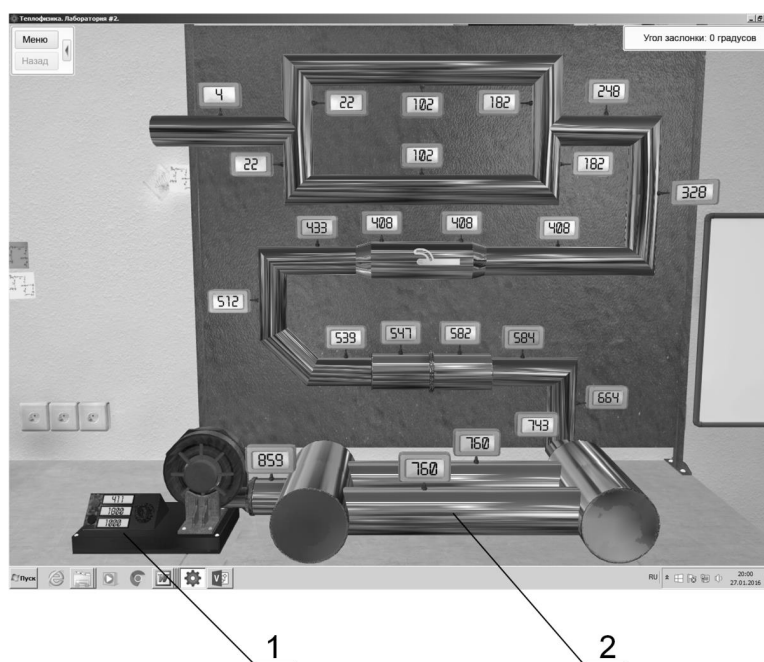


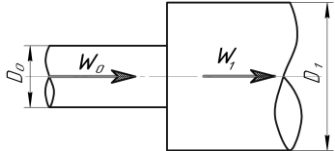
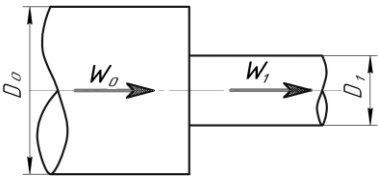
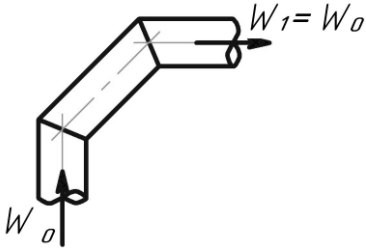
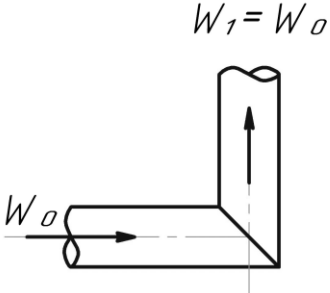
Рисунок – Схема виртуальной лабораторной установки

Порядок подготовки и выполнения виртуального эксперимента

1. Ознакомиться с заданием на выполнение эксперимента, записать диаметры труб трассы.
2. С помощью кнопки на панели управления вентилятором 1 (см. рис. 2) включить его и установить заданный преподавателем расход воздуха.
3. Для выбранного элемента трассы записать статические давления, отображаемые на виртуальных приборах.
4. При помощи клавиши клавиатуры Print Screen сфотографировать экран.

Обработка результатов

Все результаты измерений и последующих расчётов записывают в таблицу:

Вид сопротивления	Статический напор до и после сопротивления, Па	Коэффициенты местных сопротивлений	
		Экспериментальные	Расчётные
	До		$\zeta = \left(1 - \frac{D_0^2}{D_1^2}\right)^2$
	После		
	До		$\zeta = 0,5 \left(1 - \frac{D_1^2}{D_0^2}\right)$
	После		
	До		$\zeta = 0,8$
	После		
	До		$\zeta = 1,2$
	После		

Содержание отчета по лабораторной работе

В отчёт должны быть включены следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

Виртуальная лабораторная работа № 5

Исследования течения газов в трубах

Цель работы

Изучение закономерностей изменения давлений при движении сплошной среды в канале переменного сечения на примере движения воздуха в трубе Вентури.

Краткие сведения из теории

Уравнение Бернулли является одним из основных уравнений газодинамики. Если не учитывать процессов рассеивания энергии, которые могут иметь место в текущей непрерывной среде вследствие внутреннего трения и теплообмена между различными ее участками, т. е. рассматривать течение идеальной среды, то для несжимаемой среды постоянной плотности уравнение Бернулли имеет вид

$$gh + \frac{P}{\rho} + \frac{w^2}{2} = \text{const} , \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения; h – высота относительно горизонтальной плоскости сравнения.

Как раз для этого случая это уравнение и было выведено Даниилом Бернулли в 1738 году. Если уравнение (1) умножить на плотность ρ , то получим выражение

$$\rho gh + P + \frac{w^2}{2} \rho = \text{const} , \quad (2)$$

где первые два слагаемых представляют собой выражение потенциальной энергии, часть которой обусловлена внешними силами, другая часть – давлением P ; третье слагаемое уравнения выражает кинетическую энергию.

Следовательно, уравнение Бернулли, записанное в виде выражения (2), представляет собой не что иное, как закон сохранения энергии.

Уравнение Бернулли имеет большое значение в гидравлике, аэродинамике и механике газов: его используют при расчётах каналов и трубопроводов, вентиляторов и насосов, в вопросах, связанных с фильтрацией и т. п.

Пользуясь уравнением Бернулли, необходимо иметь в виду, что оно получено без учета сил трения, и поэтому, применяя его к реальной среде (жидкости или газу), необходимо учитывать потери энергии на соответствующие местные сопротивления и трение, которые имеют место при течении сред в трубах и каналах.

Все описанные выше явления наблюдаются при движении воздуха в трубах переменного сечения. Характерным примером трубы с плавно изменяющимся сечением является труба Вентури. Профиль трубы Вентури представляет собой постепенное сужение (конфузор), плавно переходящее в расширение (диффузор) (рисунок 1). Опыт показывает, что с энергетической точки зрения постепенное сужение трубы влечёт за собой незначительную потерю энергии давления. И, наоборот, при постепенном расширении потока возникают благоприятные условия для его отрыва от стенок. Надо иметь в виду, что восстановление статического давления по сечению потока, связанное с расширением трубы, всегда более полно при постепенном расширении, чем при внезапном, и зависит от угла раскрытия диффузора, поэтому угол раскрытия диффузора всегда стараются выполнить близким к оптимальному значению.

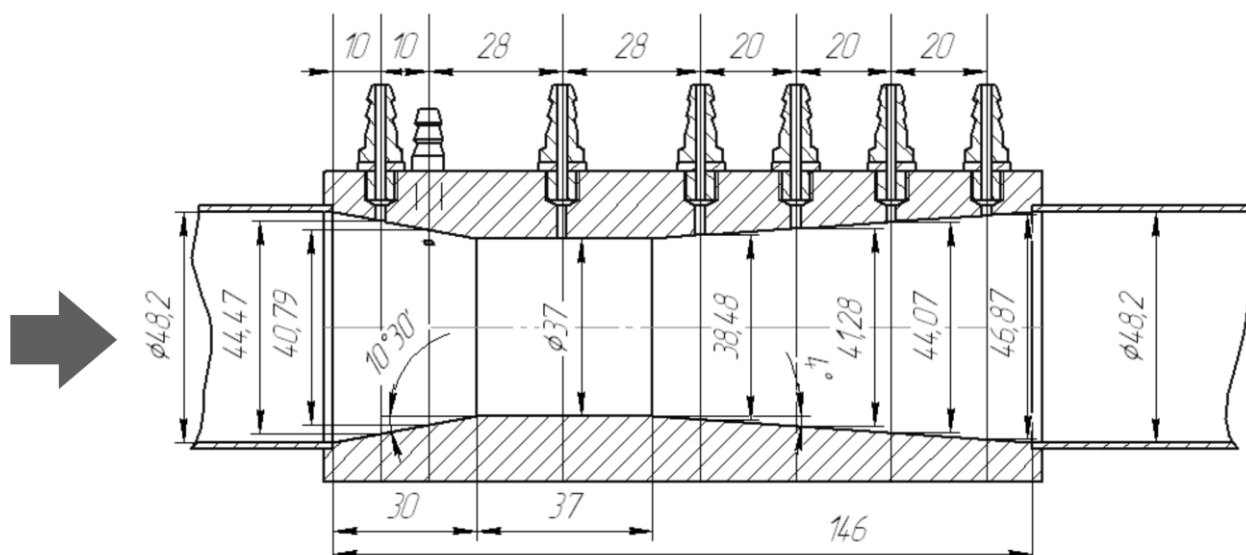


Рисунок 1 – Схема расположения точек отбора давления по длине трубы Вентури

Труба Вентури служит характерным примером, иллюстрирующим переход давления одного вида в другой. Этот переход описывается уравнением Бернулли (2), которое показывает, что при отсутствии потерь сумма энергий движущейся среды в любом сечении остается неизменной. Это может быть записано в виде

$$\rho g h_i + P_i + \frac{w^2}{2} \rho = \rho g h_{i+1} + P_{i+1} + \frac{w^2}{2} \rho. \quad (3)$$

Отдельные слагаемые этого уравнения, выражающие различные виды энергии движущейся среды, могут изменяться, но сумма их всегда остается постоянной.

Так как уравнение (3) относится к идеальному течению, то для реального случая уравнение следует записать так:

$$\rho g h_i + P_i + \frac{w^2}{2} \rho = \rho g h_{i+1} + P_{i+1} + \frac{w^2}{2} \rho + \Delta P_{\text{пот}}. \quad (4)$$

где $\Delta P_{\text{пот}}$ – потери энергии на рассматриваемом участке, перешедшие в теплоту, которая в итоге рассеивается в окружающую среду.

Введя соответствующие обозначения для статического $-P_{\text{ст}} = \rho g h + P$ и динамического –

$P_{\text{дин}} = \frac{w^2}{2} \rho$ давлений, получим выражение

$$(P_{\text{ст}})_1 + (P_{\text{дин}})_1 = (P_{\text{ст}})_2 + (P_{\text{дин}})_2 + \Delta P_{\text{пот}}, \quad (5)$$

которое и используется в данной лабораторной работе.

Описание виртуальной лабораторной установки

Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки показана на рисунке 2. Основным элементом установки является труба Вентури 2, в которую подают воздух при помощи вентилятора. На трубе установлены виртуальные приборы для измерения статического давления (результаты измерений приводятся в Па). Расход воздуха, подаваемый в трассу, регулируют кнопкой на панели управления вентилятора 1. На панели вентилятора также отображается расход воздуха (м³/час), его давление (Па) и скорость на выходе.

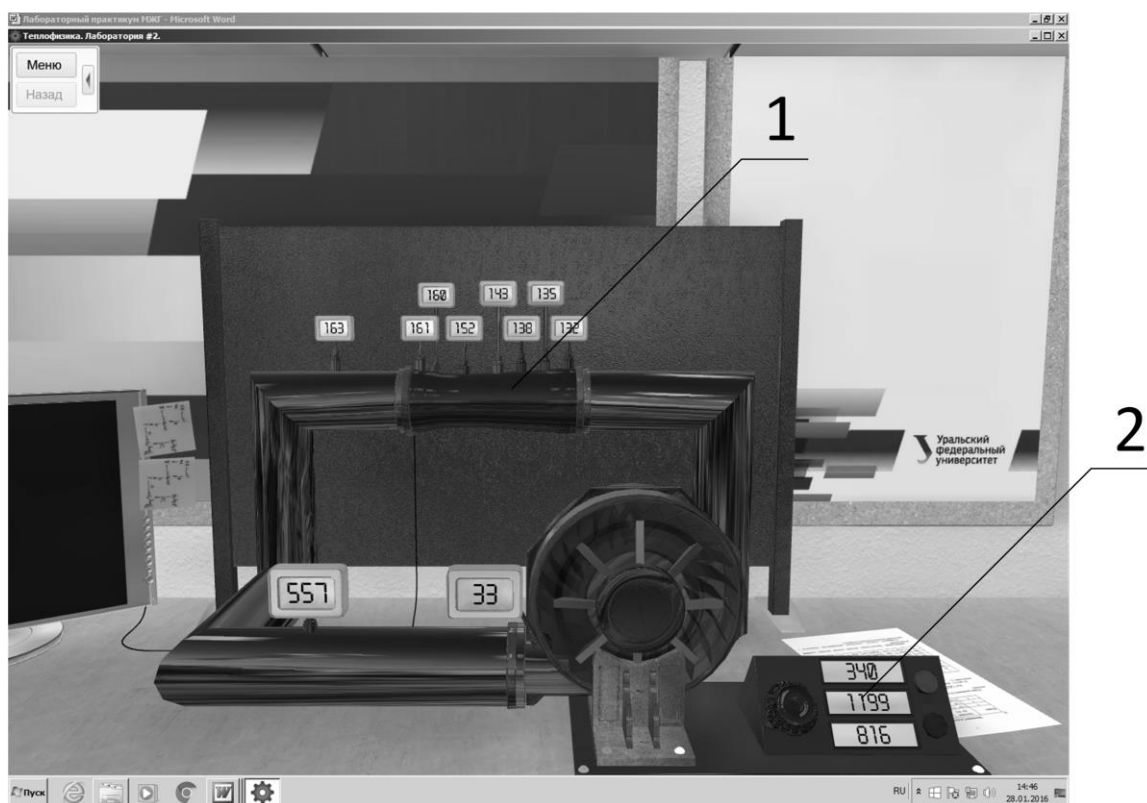


Рисунок 2 – Схема виртуальной лабораторной установки

Порядок подготовки и выполнения виртуального эксперимента

1. Ознакомиться с заданием на выполнение эксперимента, записать внутренние диаметры трубы Вентури.
2. С помощью кнопки на панели управления вентилятором 1 (см. рис. 2) включить его и установить заданный преподавателем расход воздуха.
3. Записать статические давления, отображаемые на виртуальных приборах.
4. При помощи клавиши клавиатуры Print Screen сфотографировать экран.

Обработка результатов

По полученным результатам измерений и расчётов, сведённым в таблицу, построить графические зависимости изменения статического и динамического давлений по длине экспериментального участка трубопровода, выполненного в виде трубы Вентури:

Параметр	Обозначение	Номер сечения или точки							
Расход, м ³ /с	V_t								
Диаметр трубопровода, м	d_i								
Скорость, м/с	w_i								
Статическое давление, Па	$P_{ст}$								
Динамическое давление, Па	$P_{дин}$								
Полное давление, Па	P_{Σ}								
Потерянное давление, Па	ΔP_{nom}								

График в виде эпюры давлений необходимо строить следующим образом: по оси абсцисс, которая одновременно является линией атмосферного давления, отложить длину экспериментального участка с отметками сечений, в которых был произведён замер статического давления, а по оси ординат отложить значения статического $P_{ст}$, динамического $P_{дин}$ и полного P_{Σ} давлений. Падение полного давления по длине канала

будет характеризовать потери, величина которых должна возрасть в направлении движения потока.

Содержание отчета по лабораторной работе

В отчёт должны быть включены следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

Виртуальная лабораторная работа № 6

Исследование стационарной теплопроводности

Цель работы

Изучить опытным путем явления теплопроводности и теплообмена при стационарном тепловом режиме для классического тела – цилиндра.

Краткие сведения из теории

Перенос теплоты внутри твердого тела осуществляется только теплопроводностью при наличии температурного градиента в направлении распространения теплового потока. Если перенос теплоты не сопровождается изменением во времени температурного поля внутри тела, то такой процесс называют стационарным, в противном случае – нестационарным. Характер изменения температурного поля внутри тела, вследствие теплопроводности, в общем случае, может быть описан дифференциальным уравнением теплопроводности Фурье, которое при постоянстве теплофизических свойств тела (λ, c, ρ) имеет вид:

$$\frac{dt}{d\tau} = a \nabla^2 t, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности тела, $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ м²/с; ∇^2 – оператор Лапласа.

В случае стационарного температурного поля (стационарная теплопроводность) изменения температурного поля во времени не происходит, т.е.

$$\frac{dt}{d\tau} = 0, \quad (2)$$

Закон Фурье утверждает пропорциональность плотности теплового потока и градиента температуры

$$q = -\lambda \text{grad} t, \text{ Вт/м}^2 \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); $\text{grad} t$ – градиент температуры, К/м.

Используя выражение (3), запишем уравнение, с помощью которого можно рассчитать количество теплоты, проходящее через цилиндрическую стенку в условиях стационарного теплового режима:

$$Q = -\lambda \frac{dt}{dr} 2\pi r l, \quad (4)$$

где $\frac{dt}{dr}$ – температурный градиент в радиальном направлении, К/м; r – текущий радиус цилиндрической стенки, м; l – высота (длина) цилиндрической стенки, м.

Разделив переменные в уравнении (4), получим выражение:

$$\partial t = -\frac{Q}{2\pi l \lambda} \frac{\partial r}{r}, \quad (5)$$

которое после интегрирования, алгебраических преобразований и замены радиуса r на диаметр d будет иметь вид:

$$Q = \frac{2\pi l (t_{cm1} - t_{cm2})}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}} \text{ Вт}, \quad (6)$$

где t_{cm1} и t_{cm2} – температуры внутренней и наружной поверхности цилиндра, °С; d_1 и d_2 – соответственно внутренний и наружный диаметры цилиндрической стенки, м; l – длина (высота) цилиндрической стенки, м.

Рассмотрим теплообмен наружной поверхности цилиндрической стенки с окружающей средой. Такой теплообмен характерен тем, что нагретая цилиндрическая стенка, отдавая

тепло в окружающее пространство, имеет постоянное температурное поле по всему объему. В этом случае интенсивность теплообмена стенки с окружающей средой характеризуют коэффициентом теплоотдачи α_Σ , который можно представить как сумму коэффициентов теплообмена излучением α_λ и конвекцией α_k :

$$\alpha_\Sigma = \alpha_\lambda + \alpha_k, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (7)$$

Коэффициент конвективного теплообмена в данном случае можно определить, используя формулы для описания интенсивности естественной конвекции, полученные на основании теории подобия:

$$Nu = C(Gr Pr)^n, \quad (8)$$

где Nu – число подобия Нуссельта, $Nu = \frac{\alpha_k l}{\lambda_\delta}$;

Gr – число подобия Грасгофа, $Gr = \frac{ql^3 \beta \delta t}{\nu_\delta^2}$;

Pr – число подобия Прандтля, $Pr = \nu_\delta / a_\delta$.

C и n – постоянные величины, зависящие от условий теплообмена.

Входящие в формулу (8) физические свойства воздуха: коэффициент теплопроводности, коэффициент кинематической вязкости, а также число подобия Прандтля Pr берут при средней температуре, которую вычисляют по формуле

$$t = 0,5(t_{cm2} + t_{окр}), \quad (9)$$

где $t_{окр}$ – температура окружающего пространства, °С; t_{cm2} – температура наружной поверхности стенки, °С.

В выражение числа подобия Грасгофа входят также ускорение силы тяжести $g = 9,81 \text{ м/с}^2$, разность температур $\Delta t = t_{cm2} - t_{окр}$, °С и коэффициент объемного расширения газов $\beta = 1/273$, °С⁻¹.

Значения величин C и n , входящих в формулу (8), приведены в таблице:

Режим	Значения ($Gr \cdot Pr$)	C	n
1	$1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2$	1,180	0,125
2	$5 \cdot 10^2 \dots 2 \cdot 10^7$	0,540	0,250
3	$2 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^{13}$	0,135	0,333

Решив уравнение (8) относительно коэффициента конвективного теплообмена, получим:

$$\alpha_k = \lambda_\delta C (Gr Pr)^n / l, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (10)$$

В таблице помещены значения теплофизических величин для воздуха, необходимые для вычисления α_k :

t, °C	$\nu_B \cdot 10^6$, м ² /с	$\lambda_B \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	Pr	t, °C	$\nu_B \cdot 10^6$, м ² /с	$\lambda_B \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	Pr
100	23,13	3,21	0,688	180	32,49	3,78	0,681
110	24,29	3,27	0,687	190	33,67	3,86	0,680
120	25,45	3,34	0,686	200	34,85	3,94	0,680
130	26,62	3,41	0,685	210	36,00	4,00	0,679
140	27,80	3,49	0,684	220	37,15	4,06	0,679
150	28,94	3,56	0,683	230	38,30	4,13	0,678
160	30,09	3,64	0,682	240	39,45	4,20	0,678
170	31,29	3,71	0,681	250	40,61	4,27	0,677

Коэффициент лучистого теплообмена цилиндрической поверхности с окружающей средой рассчитывают по формуле:

$$\alpha_l = \frac{4,65}{t_{cm2} - t_{окр}} \left[\left(\frac{t_{cm2} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{окр} + 273}{100} \right)^4 \right]. \quad (11)$$

Вычислив таким образом α_k и α_l , можно найти α_Σ по формуле (7).

Описание виртуальной лабораторной установки

Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки показана на рисунке. Основным элементом установки является полый цилиндр 1, внутри которого расположен электрический нагреватель. На наружной и внутренней поверхности цилиндра расположено по три термопары, служащие для контроля температуры. Электроэнергию для питания нагревателя цилиндра подводят при помощи трансформатора 2. Для управления трансформатором предусмотрен движок, смонтированный на его поверхности. Включают и выключают установку при помощи панели управления 3, снабженной виртуальными приборами для измерения температуры, силы тока и электрической мощности, поступающей для питания нагревателя цилиндра. Панель управления снабжена экраном для наблюдения за изменением температур внутренней и наружной поверхности. На панели трансформатора расположен виртуальный вольтметр для измерения напряжения. Для ускорения протекания эксперимента используется шкала управления временем 4. Сдвигая движок регулятора вправо, можно ускорить протекание эксперимента (по сравнению с реальным временем протекания процесса).

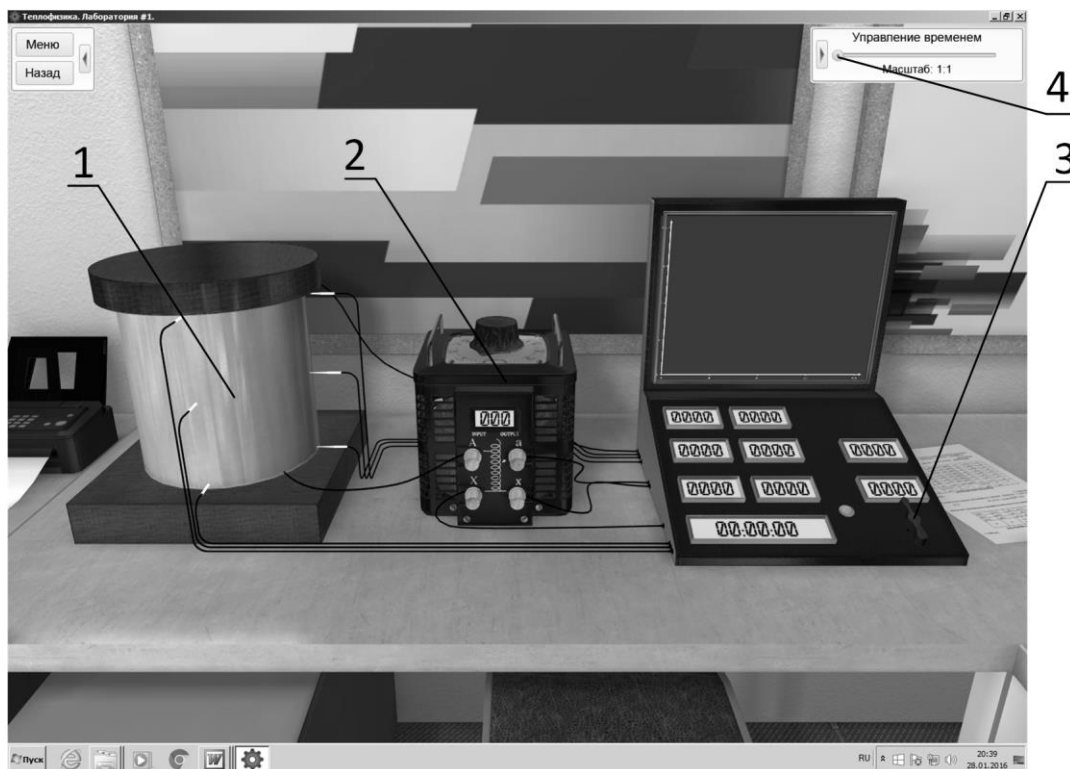


Рисунок – Схема виртуальной лабораторной установки

Порядок подготовки и выполнения виртуального эксперимента

1. Ознакомиться с заданием на выполнение эксперимента, записать исходные данные по указанию преподавателя.
2. Запустить лабораторную работу на выполнение. Внести исходные данные для эксперимента в компьютерную форму:

Параметры цилиндра

Диаметр наружный:	300 мм	
Диаметр внутренний:	200 мм	
Высота:	300 мм	
Плотность:	3500 кг/м ³	
Теплоемкость:	1000 Дж/(кг*К)	
Теплопроводность:	1 Вт/(м*К)	

3. Переключателем на панели управления включить ее и с помощью движка трансформатора установить заданную преподавателем мощность.
4. Дождаться установления стационарного режима (для ускорения можно использовать движок управления временем).
5. Записать показания виртуальных приборов.
6. При помощи клавиши клавиатуры Print Screen сфотографировать экран.

Обработка результатов

В данной лабораторной работе предлагается решить две задачи, основанные на закономерностях стационарной теплопроводности:

1. Определить коэффициент теплопроводности материала цилиндрической стенки и полученный результат сравнить со значением коэффициента теплопроводности, рассчитанным по полуэмпирической формуле.

2. Определить коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности цилиндрической стенки α_Σ и сравнить его с рассчитанным по формуле (7).

Решение первой задачи возможно при известном тепловом потоке, прошедшем только через цилиндрическую стенку. Величину этих потерь определяют из уравнения теплового баланса установки, Вт:

$$Q_{эл} = Q' + Q'', \quad (12)$$

где $Q_{эл}$ - приход теплоты, Вт ; Q' -потери теплоты через торцевые крышки (величина, заданная преподавателем), Вт ; Q'' -потери теплопроводностью через цилиндрическую стенку, Вт.

Приход теплоты рассчитывают по средним величинам напряжения и силы тока из протокола наблюдения, Вт:

$$Q_{эл} = JU, \quad (13)$$

где J - сила тока, А; U - напряжение, В.

Далее из уравнения (12) определяют величину потерь теплоты теплопроводностью через цилиндрическую стенку

$$Q'' = Q_{эл} - Q', \text{ Вт}$$

и решают уравнение (6) относительно коэффициента теплопроводности

$$\lambda = \frac{Q'' \ln \frac{d_2}{d_1}}{2\pi d(t_{cm1} - t_{cm2})}. \quad (14)$$

При выполнении второй задачи находят коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha'_\Sigma = \frac{Q''}{\pi d_2 t(t_{cm2} - \bar{t}_{окр})}, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (15)$$

где $\bar{t}_{окр}$ - среднее значение температуры окружающей среды из протокола наблюдений, $^{\circ}\text{C}$.

Остальные обозначения известны из предыдущего.

Полученный по формуле (15) результат сравнивают, как и в первой задаче, с рассчитанным по формуле (7) и делают выводы, объясняющие полученные результаты.

Содержание отчета по лабораторной работе

В отчёт должны быть включены следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

Виртуальная лабораторная работа № 7

Конвективный теплообмен при течении газов в трубах

Цель работы

Целью работы является изучение механизма конвективной теплоотдачи и теплопередачи, установление критериев, определяющих теплообмен при вынужденном движении газов в трубах.

Задачи работы:

1. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи при движении газообразной среды (воздуха) в теплообменнике типа «труба в трубе».
2. Сравнение интенсивности конвективного теплообмена при ламинарном, переходном и турбулентном режимах движения.
3. Определение коэффициента теплопередачи при переносе теплоты от одной газообразной среды к другой через разделяющую их стенку.

Краткие сведения из теории

Конвективный перенос тепловой энергии в движущейся среде обусловлен совместным действием двух механизмов – собственно конвективным переносом контактирующей с телом среды и теплопроводностью. Таким образом, транспорт теплоты осуществляется перемещением макрообъемов из области с одной температурой в другую температурную область и за счёт теплового движения микрочастиц в неизотермическом пограничном слое. Для неэлектропроводных сред интенсивность конвективного переноса обычно велика по сравнению с теплопроводностью, последняя при ламинарном течении играет заметную роль лишь для переноса тепла в направлении, поперечном течению среды. Тем не менее, участие теплопроводности в процессах конвективного теплообмена приводит к тому, что на эти процессы в целом существенно влияют теплофизические свойства движущейся среды – ее вязкость, теплопроводность, теплоёмкость и плотность, зависящие от температуры.

В технике теплообмен между двумя движущимися теплоносителями через разделяющую их твёрдую стенку называют теплопередачей. Обычно он включает в себя три взаимосвязанных процесса:

- отдачу теплоты от горячего теплоносителя к стенке;
- передачу теплоты теплопроводностью через стенку;
- теплоотдачу от стенки к холодному теплоносителю.

Уравнение теплопередачи связывает тепловой поток Q с площадью теплообменной поверхности F , m^2 , коэффициентом теплопередачи k , $Вт/(m^2 \cdot K)$ и средним температурным напором $\overline{\Delta t}$ (разностью между температурами теплоносителей) в теплообменнике:

$$Q = k \overline{\Delta t} F$$

У теплообменного аппарата, моделируемого в этой виртуальной лабораторной работе, для внутренней трубы выполняется условие, согласно которому отношение ее наружного диаметра к внутреннему меньше двух, поэтому коэффициент теплопередачи рассчитывают по формуле теплопередачи для плоской стенки:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке, $Вт/(m^2 \cdot K)$;

δ – толщина стенки, m ;

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки, $Вт/(m \cdot K)$;

α_2 – коэффициент теплоотдачи от стенки к холодному теплоносителю, $Вт/(m^2 \cdot K)$.

Так как толщина трубы δ невелика, а коэффициент теплопроводности материала высок, при расчете коэффициента теплопередачи пренебрегаем термическим сопротивлением стенки: $\frac{\delta}{\lambda} = 0$.

Коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 рассчитывают по критериальным уравнениям для вынужденного движения среды в трубах и каналах. При движении жидкостей и газов в трубах и каналах форма критериального уравнения зависит от режима движения среды. В общем случае оно имеет вид:

$$Nu = f(Gr, Re, Pr \dots), \quad (2)$$

где Nu , Gr , Re , Pr – числа подобия Нуссельта, Грасгофа, Рейнольдса и Прандтля соответственно.

Число подобия Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda}, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);

d – определяющий (характерный) размер, м;

λ – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К).

Знание числа подобия Нуссельта позволяет определить коэффициент теплоотдачи конвекцией при любом режиме движения:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}. \quad (4)$$

Число подобия Грасгофа

$$Gr = \frac{g d^3}{\nu^2} \beta \Delta T, \quad (5)$$

где $g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения; ν – коэффициент кинематической вязкости текучей среды, м²/с; d – определяющий (характерный) размер, м; β – коэффициент объемного расширения среды, 1/К; ΔT – разность температур между стенкой и средой, К. Газы, находящихся в условиях невысоких температур и давлений, можно считать идеальными. Поэтому в расчетах используем $\beta = \frac{1}{273}$, 1/К.

Число подобия Рейнольдса

$$Re = \frac{w d}{\nu}, \quad (6)$$

где w – скорость движения среды, м/с; d – определяющий (характерный) размер, м; ν – коэффициент кинематической вязкости текучей среды, м²/с.

Число подобия Прандтля

$$Pr = \frac{\nu}{a}, \quad (7)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости текучей среды, м²/с; a – коэффициент температуропроводности среды, м²/с.

При движении текучих сред в трубах и каналах выделяют ламинарный ($Re \leq 2300$), развитый турбулентный ($Re \geq 10000$) и переходный от ламинарного к турбулентному ($2300 < Re < 10000$) режимы течения.

Число подобия Нуссельта при ламинарном режиме течения ($Re \leq 2300$) может быть рассчитано как функция других чисел подобия по критериальному уравнению, полученному М. А. Михеевым:

$$Nu = 0,15 Re^{0,33} Pr^{0,33} (Gr Pr)^{0,1} \varepsilon_l. \quad (8)$$

Поправочный коэффициент ε_l , учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, можно

определить по данным таблицы 1 при отношении длины трубопровода l_{mp} к ее диаметру d_{mp} менее 50. Если $l_{mp}/d_{mp} \geq 50$, $\varepsilon_l = 1$.

Таблица 1 – Значение ε_l при вязкостно-гравитационном режиме течения среды

l_{mp}/d_{mp}	1	2	5	10	15	20	30	40	50
ε_l	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

Число подобия Нуссельта при турбулентном течении среды ($Re \geq 10^4$) в прямых гладких трубах рассчитывают по формуле М. А. Михеева:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \varepsilon_l. \quad (9)$$

Поправочный коэффициент ε_l , учитывающий влияние на теплоотдачу гидродинамической стабилизации потока на начальном участке теплообмена, можно определить при $l_{mp}/d_{mp} < 50$ по формуле $\varepsilon_l = 1 + 2 \frac{d_{mp}}{l_{mp}}$, а при $l_{mp}/d_{mp} \geq 50$ $\varepsilon_l = 1$.

Переходный режим течения ($2300 < Re < 10^4$) сочетает элементы ламинарного и турбулентного течений. В этом случае коэффициент теплоотдачи можно рассчитать по формуле:

$$Nu = K_0 Pr^{0,43} \varepsilon_l, \quad (10)$$

где комплекс K_0 зависит от числа Рейнольдса (таблица 2), а поправку ε_l рассчитывают так же, как и при турбулентном режиме течения.

Таблица 2 – Зависимость комплекса K_0 от числа Рейнольдса

Число Re	2200	2300	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
K_0	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

Определяющие параметры для расчета критериев в формулах (8), (9) и (10):

- определяющая (характерная) температура – средняя температура среды в трубе или кольцевом канале;
- определяющий (характерный) размер для трубы – ее внутренний диаметр;
- определяющий (характерный) размер для кольцевого канала – эквивалентный или гидравлический диаметр $d_{эkv}$, равный разности внутреннего диаметра наружной трубы $D_{вн}$ и внешнего диаметра внутренней $d_{нар}$:

$$d_{эkv} = D_{вн} - d_{нар}; \quad (11)$$

- определяющая (характерная) скорость – средняя по сечению трубы скорость движения, м/с:

$$w = V / f, \quad (12)$$

- где V – объемный расход среды, м³/с; f – площадь поперечного сечения канала, м².

Описание виртуальной лабораторной установки

Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки показана на рисунке. Основным элементом установки является теплообменник «труба в трубе» рабочей длиной 1 м, по внутренней трубе 1 которого диаметром 0,02 м подается подогретый воздух (горячий теплоноситель) из конвектора 3. Температура подогрева воздуха и его расход регулируются кнопками на панели управления. Во внешний контур теплообменника,

представляющий из себя кольцевой канал, образованный наружной трубой с внутренним диаметром $D_{вн}=0,03$ м и внутренней с наружным диаметром $d_{нар}=0,022225$ м трубами, подается воздух из конвектора 2 (холодный теплоноситель). Его температуру и расход также задают кнопками на панели управления конвектора. Для выбора режима (прямоток и противоток) и переключения течения холодного воздуха в теплообменнике служит трехпозиционный управляющий клапан 4. Клапаны отвода холодного теплоносителя из теплообменника 5 срабатывают автоматически в зависимости от положения управляющего клапана 4. Для измерения температуры в трубопроводе горячего теплоносителя размещены датчики 6, а в кольцевом канале для холодного теплоносителя датчики 7. Контроль температуры в горячем контуре теплообменника осуществляется измерительным прибором 8, а в холодном контуре – измерительным прибором 9. График изменения температур теплоносителей можно просмотреть на мониторе 10.

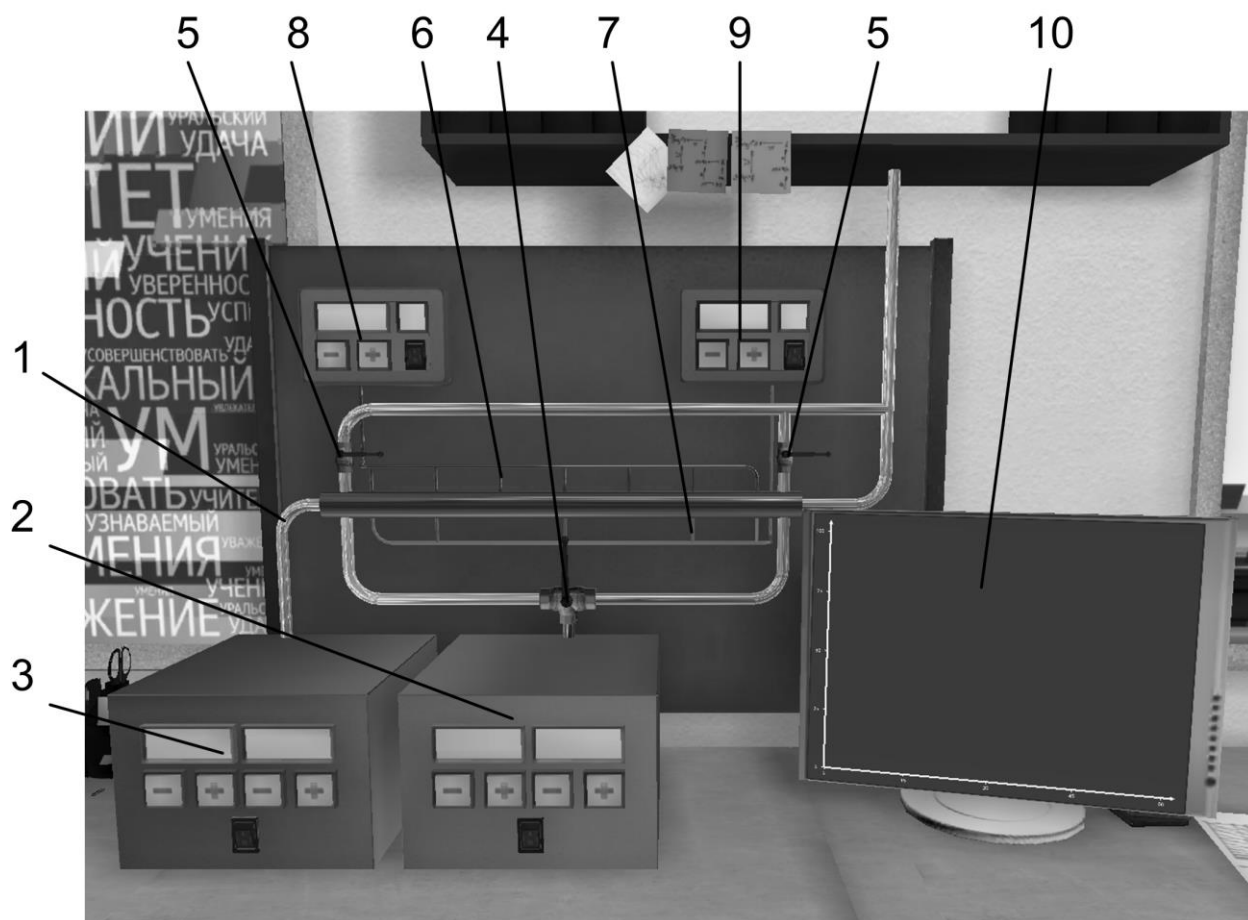


Рисунок – Схема виртуальной лабораторной установки

Порядок подготовки и выполнения виртуального эксперимента

1. Ознакомиться с заданием на выполнение эксперимента, записать параметры, которые необходимо установить на виртуальных приборах.
2. С помощью управляющего клапана 4 установить заданный режим течения теплоносителей.
3. Включить виртуальные приборы контроля температуры 8 и 9.
4. Включить конвектор холодного воздуха 2 и установить заданный расход и температуру.
5. Включить конвектор горячего воздуха 3 и установить заданный расход и температуру.

6. Убедиться в том, что все заданные параметры верны, и включить кнопку «Начать работу».
7. Наблюдая за изменением температур теплоносителей при помощи измерительных приборов 8 и 9, монитора 10, дожидаться установления стационарного режима.
8. После установления стационарного режима записать температуры горячего и холодного теплоносителей.

Обработка результатов

При обработке результатов рекомендуется все расчеты проводить в системе единиц СИ.

1. Рассчитать среднеарифметическое значение температуры горячего и холодного теплоносителей.
2. Используя формулу (12), определить скорости движения обоих теплоносителей.
3. Рассчитать число Рейнольдса для горячего теплоносителя по формуле (6), используя в качестве определяющего размера внутренний диаметр трубы **1** (см. рис). Коэффициент кинематической вязкости воздуха необходимо определить с учетом среднеарифметической температуры, используя данные таблицы теплофизических свойств воздуха, приведенной в Приложении.
4. Рассчитать число Рейнольдса для холодного теплоносителя по формуле (6), используя в качестве определяющего размера эквивалентный диаметр кольцевого канала (формула 11).
5. Определить режимы движения холодного и горячего теплоносителей (ламинарный, турбулентный или переходный).
6. В зависимости от режима движения рассчитать число Нуссельта для горячего и холодного теплоносителей, используя формулы 8, 9 либо 10. Необходимые для расчета теплофизические параметры воздуха приведены в Приложении.
7. Определить, используя формулу (4), коэффициенты конвективной теплоотдачи для холодного и горячего воздуха. Значение коэффициента теплопроводности воздуха в зависимости от температуры приведены в Приложении.
8. Рассчитать коэффициент теплопередачи по формуле (1). Термическое сопротивление стенки, разделяющей потоки теплоносителей, принять равным нулю.
9. Занести полученные значения коэффициентов теплоотдачи для холодного и горячего теплоносителей и коэффициент теплопередачи в итоговую форму программы. Целую и дробную часть полученных значений необходимо разделять точкой.

Содержание отчета по лабораторной работе

В отчёт должны быть включены следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица – теплофизические свойства воздуха в зависимости от температуры

Температура, °С	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Коэффициент кинематической вязкости $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Число Прандтля Pr
0	0,0244	13,28	0,707
10	0,0251	14,16	0,705
20	0,0259	15,06	0,703
30	0,0267	16,00	0,701
40	0,0276	16,96	0,699
50	0,0283	17,95	0,698
60	0,0290	18,97	0,696
70	0,0296	20,02	0,694
80	0,0305	21,09	0,692
90	0,0313	22,10	0,690
100	0,0321	23,13	0,688

Лабораторная работа № 8

Теплообмен излучением

Цель работы

Изучить опытным путем явления теплообмена излучением. Ознакомиться с бесконтактным измерением температуры с помощью пирометра и тепловизора. Изучить влияние степени черноты на точность измерения температуры бесконтактным методом.

Краткие сведения из теории

Температура — важнейший параметр всех технологических процессов. В металлургической и химической промышленности весьма широк диапазон контролируемых температур и разнообразны условия их измерения, поэтому применяют разнообразные методы измерения и измерительные приборы.

Различают две группы методов измерения: **контактные (собственно термометрия)** и **бесконтактные (пирометрия или термометрия излучения)**, применяемые в основном для измерения очень высоких температур. В некоторых случаях бесконтактные методы измерения предпочтительнее контактных, особенно когда измеряется температура движущихся или высоконагретых объектов (температура заготовки в процессе прокатки, температура расплавов и др.).

Принцип действия пирометров излучения основан на использовании теплового излучения нагретых тел. По сравнению с приборами, основанными на других методах измерения температуры, пирометры излучения имеют следующие преимущества:

- измерение основано на бесконтактном способе, следовательно, отсутствует искажение температурного поля, вызванное введением преобразовательного элемента прибора в измеряемую среду;
- верхний предел измерения температуры теоретически не ограничен;
- имеется возможность измерения температур пламени и высоких температур газовых потоков при больших скоростях, когда трудно использовать другие методы.

Существенным недостатком пирометров является зависимость их показаний от различных свойств измеряемого тела.

Как известно из курса теплофизики, лучистая энергия выделяется нагретым телом в виде волн различной длины. При сравнительно низких температурах (до 500 °С) нагретое тело испускает инфракрасные лучи, не воспринимаемые человеческим глазом. По мере повышения температуры цвет тела меняется от темно-красного до белого, содержащего волны всех воспринимаемых глазом длин. Одновременно с повышением температуры нагретого тела и изменением его цвета быстро возрастает спектральная энергетическая яркость (СЭЯ), т. е. излучение определенной длины волны, а также заметно увеличивается суммарное (интегральное) излучение. Указанные свойства нагретых тел используют для измерения их температуры и в соответствии с этими свойствами пирометры излучения делятся на квазимонохроматические, спектрального отношения, полного и частичного излучения. Основные методы пирометрии для тел со сплошным спектром излучения и наименования средств измерения приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные методы пирометрии и типы пирометров

Свойство спектра излучения объекта	Наименование средств измерений
Интегральная плотность излучения, описываемая для абсолютно черного тела законом Стефана-Больцмана	Пирометр полного излучения (радиационный пирометр)
Спектральная плотность излучения в ограниченном интервале длин волн	Пирометр частичного излучения
Спектральная плотность излучения в узком интервале, позволяющем применить закон Планка	Квазимонохроматический (яркостный) пирометр
Отношение плотности спектрального излучения в двух спектральных интервалах	Пирометр спектрального отношения (цветовой пирометр)
Отношение плотности спектрального излучения в трех и более спектральных интервалах	Пирометр спектрального отношения

Теоретически можно обосновать лишь явление лучеиспускания абсолютно черного тела (степень черноты этого тела принимают равным единице). Для реальных тел этот показатель меньше единицы, причем он зависит как от природы данного тела, так и от состояния его поверхности и температуры. Данные по степени черноты различных материалов в зависимости от эффективной длины волны излучения приведены в табл. 2. Таблица 2 – Степень черноты различных материалов в зависимости от эффективной длины волны

Материалы	Степень черноты (доли единицы)			
	при эффективной длине волны, мкм			
	1	2,2	5,1	8-14
Алюминий	0,1-0,2	0,02-0,2	0,02-0,2	0,02-0,1
Оксид алюминия	0,40	0,2-0,4	0,2-0,4	0,2-0,4
Хром	0,4	0,05-0,3	0,03-0,3	0,02-0,2
Оксид хрома	0,75	0,75		0,70
Золото	0,3	0,01-0,1	0,01-0,1	0,01-0,1
Молибден	0,25-0,35	0,1-0,3	0,1-0,15	0,10
Оксид молибдена	0,5-0,9	0,4-0,9	0,3-0,7	0,2-0,6
Никель	0,35	0,25		0,04
Оксид никеля	0,8-0,9	0,4-0,7	0,3-0,6	0,2-0,5
Титан	0,5-0,75	0,2-0,5	0,1-0,3	0,05-0,2
Оксид титана	0,80	0,6-0,8	0,5-0,7	0,5-0,6
Оксид железа	0,7-0,9	0,7-0,9	0,6-0,9	0,5-0,9
Железо	0,35	0,1-0,3	0,05-0,25	0,05-0,2
Железо грубой обработки		0,6-0,9	0,5-0,8	0,5-0,7
Литое железо	0,35	0,4-0,6		
Цинк	0,50	0,05	0,03	0,02
Оксид цинка	0,60	0,15	0,1	0,1
Вольфрам	0,39	0,1-0,3	0,05-0,25	0,03-0,1
Олово	0,25	0,1-0,3	0,05	0,05

Материалы	Степень черноты (доли единицы)			
	при эффективной длине волны, мкм			
	1	2,2	5,1	8-14
Оксид олова	0,60	0,60		0,60
Серебро	0,04	0,02	0,02	0,02
Оксид серебра	0,10	0,10		0,10
Сталь холоднокатаная	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9	
Листовая сталь		0,6-0,7	0,5-0,7	0,4-0,6
Отполированная сталь	0,35	0,2	0,1	0,1
Литая сталь	0,35	0,25-0,4	0,1-0,2	
Окисленная сталь	0,8-0,9	0,8-0,9	0,7-0,9	0,7-0,9
Нержавеющая сталь	0,35	0,2-0,9	0,15-0,8	0,1-0,8
Латунь полированная	0,35	0,01-0,05	0,01-0,05	0,01-0,05
Латунь отшлифованная	0,65	0,4	0,3	0,3
Латунь окисленная		0,6	0,5	0,02-0,2
Медь полированная	0,05	0,03	0,03	0,03
Медь грубой обработки	0,05-0,2	0,05-0,2	0,05-0,15	0,05-0,1
Медь окисленная	0,2-0,8	0,7-0,9	0,5-0,8	0,4-0,8

Так как степень черноты реального тела переменна, все пирометры градуируют по излучению абсолютно черного тела. Поэтому в процессе измерения температуры реальных тел пирометры фиксируют некую условную температуру, которая может значительно отличаться от истинной. Поправка в показания либо вводится вручную, либо пересчет осуществляется автоматически.

Работа **пирометра полного излучения** (радиационного пирометра) основана на анализе интегрального (полного) излучения от объекта (закон Стефана-Больцмана). Поэтому соотношение измеряемой этим прибором условной температуры T_p (обычно ее называют радиационной) и истинной T вычисляется из соотношения

$$T = T_p \sqrt{\frac{1}{\varepsilon}},$$

где ε – интегральная степень черноты.

Работа **пирометров частичного излучения** построена на анализе теплового излучения от объекта измерения в ограниченной части спектра. Теоретического закона, связывающего энергию частичного излучения с температурой, не существует, и поэтому эти приборы градуируются индивидуально. Как правило, конструктивно для пирометров частичного излучения должен быть заложен блок введения поправки на степень черноты измеряемого объекта.

Квазимонохроматические пирометры оценивают излучение в достаточно узком диапазоне длин волн (обычно выбирают длину волны $\lambda=0,65$ мкм), что осуществляется за счет специального фильтра. Измеряемая этим прибором температура также условна и называется яркостной T_y . Связь между действительной и яркостной температурой можно проследить, используя закон Планка или закон Вина (для ограниченного интервала температур и малых длин волн):

$$\frac{1}{T_y} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \frac{1}{\varepsilon_\lambda},$$

где λ – используемая длина волны излучения, мкм;

$C_2=1,4388 \cdot 10^{-2}$ м·К;

ε_λ – спектральный коэффициент излучения, соответствующий используемой длине волны.

Для пирометров **спектрального отношения** обычно используют измерение спектральной плотности излучения двух или более длин волн. Условная температура, измеренная такими приборами, носит название цветовой T_u и связана с действительной температурой следующим соотношением:

$$\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T} = \frac{\ln(\varepsilon_{\lambda 1} / \varepsilon_{\lambda 2})}{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)},$$

где $\varepsilon_{\lambda 1}$ и $\varepsilon_{\lambda 2}$ – спектральные коэффициенты излучения, соответствующие используемым в приборе длинам волн.

ПЕРЕНОСНОЙ ИНФРАКРАСНЫЙ ПИРОМЕТР С ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛА «ТЕРМОСКОП-100»

Инфракрасный переносной пирометр «Термоскоп-100» предназначен для измерения температур в энергетике, металлургии и других отраслях промышленности. Это прибор, анализирующий инфракрасное излучение от объекта измерения в ограниченном диапазоне частот при помощи фотоприемника. В зависимости от спектрального диапазона и модели главной линзы пирометра прибор может работать в различных температурных диапазонах (табл. 3).

Таблица 3 – Температурные диапазоны, характеристики оптической системы и фотоприемников пирометра «Термоскоп-100»

Модель и материал главной линзы	Температурный диапазон, °С	Спектральный диапазон, мкм	Показатель визирования	Фотоприемник
НТ0, германий	-20-500	8-14	30:1	Термобатарея
НТ1, германий	0-500	8-14	30:1	Термобатарея
СТ0, стекло	400-900	1.4-1.65	50:1	In-Ga-As фотодиод
СТ1, стекло	500-1200	1.4-1.65	50:1	In-Ga-As фотодиод
ВТ0, стекло	700-1300	0.75-1.1	75:1	Кремниевый фотодиод
ВТ1, стекло	800-1400	0.75-1.1	75:1	Кремниевый фотодиод
ВТ2, стекло	1000-2000	0.75-1.1	75:1	Кремниевый фотодиод
СЛ, флюорит	300-1500	5.0-5.2	50:1	Термобатарея

Используемый в лабораторном практикуме прибор имеет спектральный диапазон от 8 до 14 мкм (НТ) с температурным диапазоном измерения от -20 до 800 °С с показателем визирования 30:1.

Термин «показатель визирования» введен в пирометрической технике для описания и сравнения оптических систем пирометров. Показатель визирования – это отношение расстояния между пирометром и объектом измерения к диаметру пятна визирования. Пятно визирования – это минимальный диаметр объекта измерения, необходимый для контроля температуры при эксплуатации прибора. Таким образом, пирометром с более высоким показателем визирования возможно измерение температуры объекта, меньшего по своим геометрическим размерам. У современных пирометров величина показателя визирования может достигать значения 500:1 и выше. **Рекомендуется, чтобы пятно визирования было несколько меньше, чем сам объект измерения.** У современных

пирометров различают два вида оптической системы: с постоянным и переменным фокусным расстоянием. «Термоскоп-100» – прибор с постоянным фокусным расстоянием. Пятно визирования в фокусе имеет наименьший диаметр, а в бесконечности максимальный. Поэтому различают два показателя визирования: в фокусе и в бесконечности (в фокусе показатель визирования максимальный). Пирометры данного типа рекомендуется размещать таким образом, чтобы фокусное расстояние и расстояние между пирометром и объектом измерения совпадали. Если это условие по каким-либо причинам невыполнимо, тогда необходимо учитывать, пятно какого диаметра необходимо обеспечить на выбранном расстоянии. На рис. 1 приведен пример оптической системы, где указан диаметр пятна визирования в зависимости от расстояния.

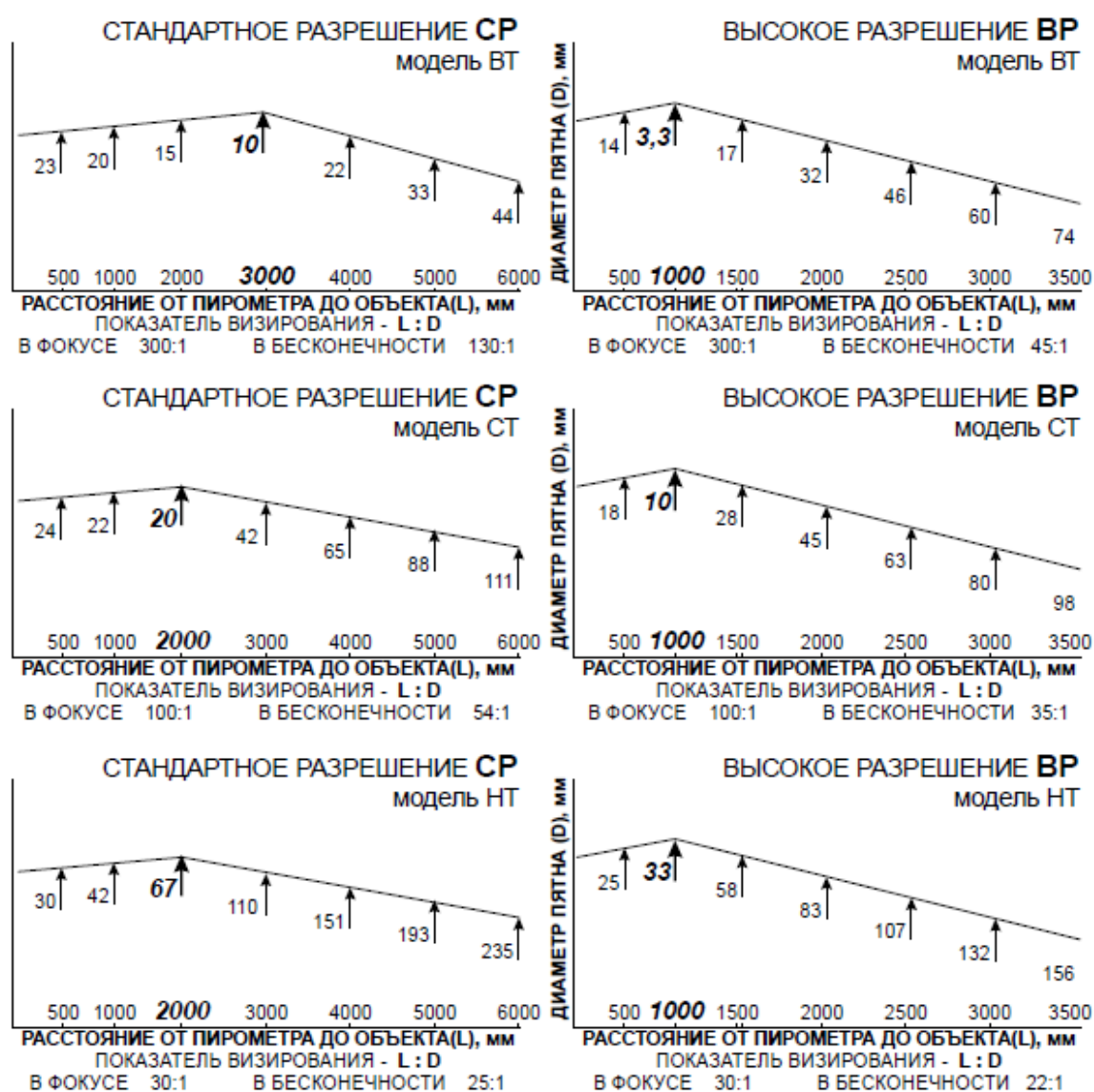


Рисунок 1 – Пример определения диаметра пятна визирования для пирометра «Термоскоп-100»

Правильное наведение пирометра на объект измерения – залог представительных измерений. Для пирометров излучения необходимо, чтобы объект полностью перекрывал пятно визирования. На рис. 2 приведены примеры расположения пятна визирования относительно объекта измерения. Первый вариант – правильный: объект с гарантированным запасом перекрывает пятно визирования. Второй вариант –

нежелательный: размеры объекта сопоставимы с пятном визирования, при небольшом смещении объекта пирометр будет давать неверные показания (занижать температуру). Третий вариант – неправильный: пятно визирования больше объекта, пирометр будет всегда занижать показания.

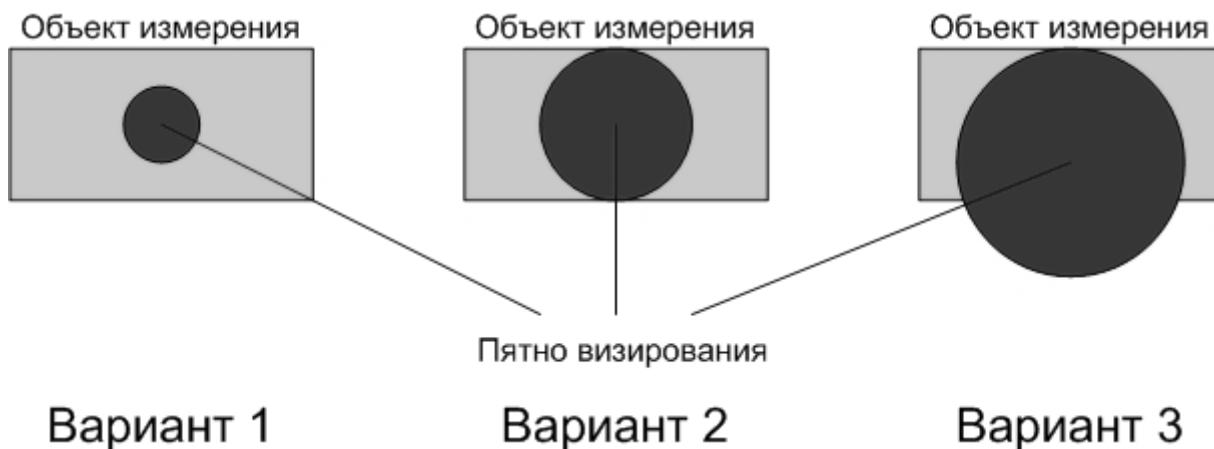


Рисунок 2 – Примеры расположения пятна визирования относительно объекта измерения

Прибор имеет 5 режимов работы: «Измерение», «Сглаживание», «Выборка минимума», «Выборка максимума», «Размах».

Работа прибора начинается после нажатия на курок. При удержании курка прибор производит измерения и расчеты по алгоритмам обработки. После отпускания курка измерения прекращаются. Время от нажатия до отпускания курка далее называется «периодом измерения».

В режиме «Измерение» на дисплей прибора выдается текущее значение температуры.

Режим «Сглаживание» позволяет выполнять усреднение текущих значений температуры.

Алгоритм сглаживания выполняется в соответствии с формулой:

$$T_{ci} = (T_{ci-1} + t_i) / i ,$$

где t_i - текущее значение температуры;

T_{ci} - текущее сглаженное значение температуры;

T_{ci-1} - предыдущее сглаженное значение температуры

В режиме «Выборка максимума» осуществляется отображение максимального значения температуры, представляющего собой наибольшее значение температуры за период измерения.

Работа в режиме «Выборка минимума» аналогична работе в режиме «выборка максимума», только происходит выборка минимального значения температуры. В режиме «Размах» осуществляется расчет разности между максимальным и минимальным значением температуры.

При наличии батарей питания прибор находится в режиме пониженного потребления. При нажатии на курок включается лазерный целеуказатель, дисплей, подсветка дисплея, и прибор начинает измерение температуры. После отпускания курка лазерный целеуказатель выключается, и через 15 секунд, если не производятся нажатия на клавиатуру, прибор переходит в режим пониженного потребления. Если производятся нажатия на клавиатуру, то прибор переходит в режим пониженного потребления через 15 секунд после последнего нажатия. При нажатии любой клавиши, кроме курка, прибор включает дисплей и подсветку. На дисплее при этом высвечиваются результаты последнего измерения.

Вид и расположение дисплея и органов настройки прибора показаны на рис.3.

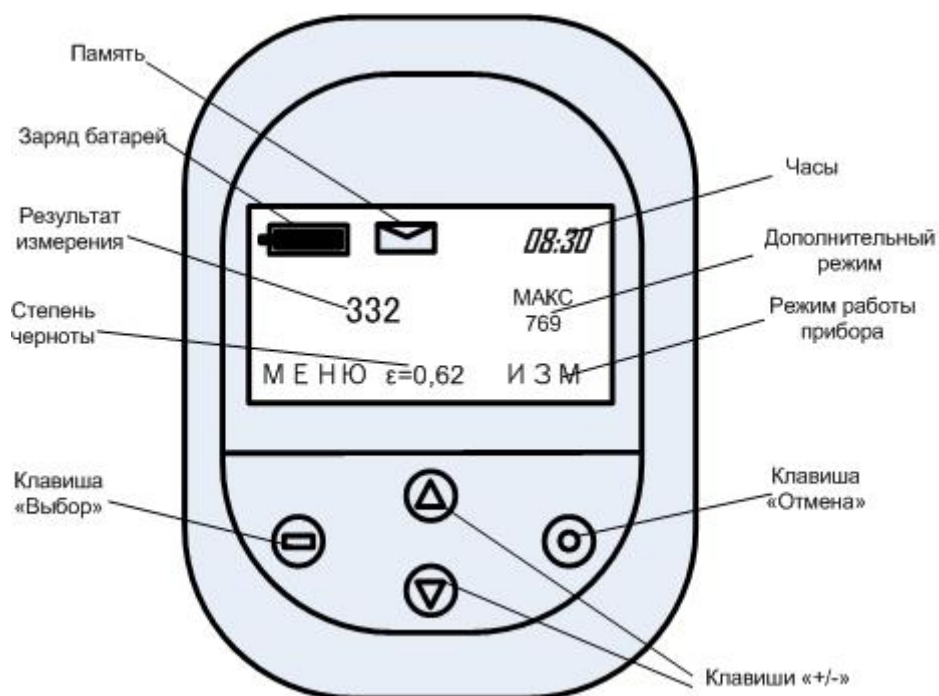


Рисунок 3 – Дисплей и органы настройки пирометра «Термоскоп 100»

Для удобства пользования на дисплее одновременно отображаются результаты измерения в двух режимах работы прибора. Крупные цифры – главный дисплей. В нижней строке справа сокращенно обозначен режим работы, результаты которого отображаются на главном дисплее.

В правой верхней части – малый дисплей. На нем отображен результат дополнительного режима работы.

В средней нижней части отображается значение степени черноты ϵ . Настройка степени черноты производится нажатием клавиш «+/-». Результаты измерения корректируются одновременно с настройкой степени черноты.

В верхней части дисплея расположены пиктограммы и часы (часы и минуты). Пиктограмма «батарей» показывает процесс разряда батарей питания прибора. Пиктограмма «конверт» указывает, что включен режим работы с памятью.

В левой нижней части указано назначение клавиши «Выбор». В данном примере – «МЕНЮ», переход к настройке прибора.

Настройка прибора производится с помощью системы меню. Переход между пунктами меню и изменение параметров производится нажатием клавиш «+/-».

Клавишей «Отмена» производится выход из меню или отмена изменения параметра.

Назначение клавиши «Выбор» указывается в левой нижней части дисплея.

При настройке прибора пользователь может выбрать режимы работы, результаты которых будут отображаться на главном и малом дисплеях (пункты меню «ГЛАВНЫЙ ДИСПЛЕЙ» и «МАЛЫЙ ДИСПЛЕЙ»), а также настроить часы и память.

Настройка часов производится при выборе пункта меню «ВРЕМЯ». Часы и минуты настраиваются отдельно. Часы прибора показывают время суток и питаются от батарей питания прибора. Поэтому при замене батарей питания часы необходимо настроить.

Настройки и действия с памятью производятся при выборе пункта меню «ПАМЯТЬ». Подпункты меню: «ПАМЯТЬ:ВКЛ/ВЫКЛ» - выключает режим работы с памятью («ВЫКЛ»), а также позволяет включить ручной («РУЧН») или автоматический («АВТО») режим работы;

«ПАМЯТЬ:ПРОСМОТР» - просмотр результатов измерений, сохраненных в памяти;

«ПАМЯТЬ:ДЕЙСТВИЯ» :

«ПЕРЕДАТЬ» - значения всех непустых ячеек памяти передается по интерфейсу RS-232 в компьютер. Настройка порта: 9600, 8N1.

Каждая ячейка передается в формате ASCII в виде:

23 12:15:20 E=0.95 T=1245 MAX

Первое поле – номер ячейки, далее – время (ЧАС:МИН:СЕК), степень черноты, температура, режим работы (TRC-измерение, AVR-сглаживание, MAX-максимум, MIN-минимум, DIF-размах). Окончание строки CR-LF. «ОЧИСТИТЬ» - стирает всю память.

Ручной режим позволяет записать в память результат последнего измерения. Для записи требуется подтверждение оператора. При включенном режиме ручной работы с памятью (пиктограмма «конверт») после завершения измерений (отпускания курка) клавиша «Выбор» принимает назначение «СОХР» - сохранить в память. При этом над надписью высвечивается номер ячейки, в которую будет произведено сохранение. В течение 5 сек. Можно нажать клавишу «Выбор», и результат измерения будет записан в память. Результат, выходящий за пределы измерения прибора (ситуация «НИЖЕ» или «ВЫШЕ»), игнорируется.

После записи в последнюю ячейку памяти следующая запись не производится (до очистки памяти).

Для каждого измерения сохраняются:

- значение температуры на главном дисплее прибора;
- значение степени черноты ϵ ;
- режим работы, результаты которого отображаются на главном дисплее;
- время измерения (часы и минуты).

Автоматический режим позволяет записать в память непрерывный ряд измерений, производимых с максимальной скоростью измерения прибора (250мс). Такой режим удобен, например, для исследования распределения температуры по длине движущегося объекта (трубы, заготовки и т.п.).

При включенном режиме автоматической работы с памятью (пиктограмма «конверт» и номер первой непустой ячейки памяти под главным дисплеем) от момента нажатия до момента отпускания курка в память записывается непрерывный ряд измерений. Результат, выходящий за пределы измерения прибора (ситуация «НИЖЕ» или «ВЫШЕ»), записывается в память. После записи в последнюю ячейку памяти следующая запись не производится (до очистки памяти).

Для каждого измерения сохраняются:

- значение температуры в режиме «Измерение»;
- значение степени черноты ϵ ;
- режим работы («Измерение»);
- время измерения (часы и минуты).

ТЕПЛОВИЗОР FLIR T 420 bx

Принцип работы тепловизора

Тепловизор – устройство для наблюдения за распределением температуры исследуемой поверхности. Распределение температуры отображается на дисплее (или в памяти) тепловизора как цветное поле, где определённой температуре соответствует определённый цвет. Как правило, на дисплее отображается диапазон температуры видимой в объектив поверхности. Типовое разрешение современных тепловизоров – 0,1 °C.

Все объекты, температура которых выше абсолютного нуля ($0\text{ K} = -273.15\text{ °C}$), излучают инфракрасные волны. Человеческий глаз не способен увидеть инфракрасное излучение.

Тепловизор измеряет инфракрасное излучение в длинноволновом спектре в пределах поля обзора. Исходя из этого, осуществляется расчет температуры измеряемого объекта. Факторы расчета излучательной способности (ϵ) поверхности измеряемого объекта и компенсации отраженной температуры (КОТ = компенсация отраженной температуры) – значения этих переменных можно вручную задать в тепловизоре.

Термография (измерение температуры посредством тепловизора) является пассивным, бесконтактным методом измерения. ИК-изображение отображает распределение температуры на поверхности объекта. Излучение, регистрируемое тепловизором, состоит из излучаемого, отраженного и проходящего длинноволнового инфракрасного излучения (рис. 4), исходящего от объектов, расположенных в пределах поля зрения тепловизора.

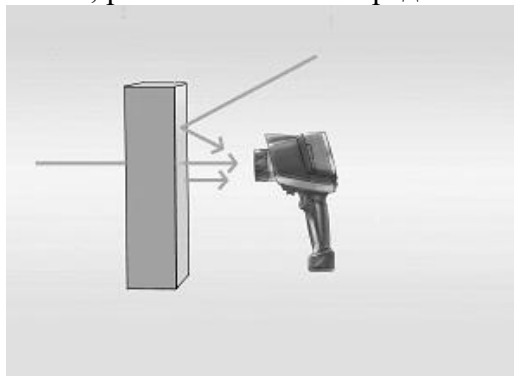


Рисунок 4 – Излучение, отражение и пропускание

Коэффициент излучения (ϵ). Коэффициент излучения (ϵ) это степень способности материала излучать (выделять) инфракрасное излучение. ϵ изменяется в зависимости от свойств поверхности, материала, и в случае с некоторыми материалами – от температуры измеряемого объекта.

Многие неметаллические материалы (например, ПВХ, бетон, органические вещества) обладают высокой излучательной способностью в длинноволновом инфракрасном диапазоне, которая не зависит от температуры ($\epsilon \approx 0,8$ до $0,95$).

Металлы, особенно материалы с блестящей поверхностью, обладают низкой излучательной способностью, которая может меняться в зависимости от температуры.

Коэффициент излучения ϵ можно вручную задать в тепловизоре.

Коэффициент отражения (ρ). Коэффициент отражения (ρ) это степень способности материала отражать инфракрасное излучение. ρ зависит от свойств поверхности, температуры и типа материала.

Как правило, гладкие, полированные поверхности имеют большую отражательную способность, чем шероховатые, матовые поверхности, изготовленные из одного и того же материала.

Компенсацию отраженной температуры (КОТ) можно вручную настроить в тепловизоре.

Во многих областях применения отраженная температура соответствует температуре окружающей среды.

Коэффициент пропускания (τ). Коэффициент пропускания (τ) это степень способности материала пропускать (проводить через себя) инфракрасное излучение. τ зависит от типа и толщины материала. Большинство материалов являются материалами не пропускающего типа, т.е. устойчивыми к длинноволновому инфракрасному излучению.

Закон теплового излучения Кирхгофа. Инфракрасное излучение, регистрируемое тепловизором, состоит из:

- 1) • излучения, испускаемого объектом измерения;
- 2) • отраженного внешнего излучения и
- 3) • пропущенного объектом измерения излучения.

Сумма данных компонентов всегда принимается за 1 (или 100%):

$$\epsilon + \rho + \tau = 1.$$

Поскольку коэффициент пропускания редко играет значительную роль на практике, τ опускается и формула

$$\epsilon + \rho = 1,$$

упрощается до

$\varepsilon + \rho = 1$.

Для термографии это означает, что чем ниже коэффициент излучения, тем выше уровень отраженного инфракрасного излучения, тем сложнее осуществить точное измерение температуры и тем более важным становится правильная настройка компенсации отраженной температуры (КОТ).

Определим взаимосвязь между излучением и отражением.

1. Объекты измерения с высоким коэффициентом излучения ($\varepsilon \geq 0.8$) имеют низкий коэффициент отражения. Температуру данных объектов можно очень легко измерить с помощью тепловизора.
2. Объекты измерения со средним коэффициентом излучения ($0.6 < \varepsilon < 0.8$) имеют средний коэффициент отражения. Температуру данных объектов можно легко измерить с помощью тепловизора.
3. Объекты измерения с низким коэффициентом излучения ($\varepsilon \leq 0.6$) имеют высокий коэффициент отражения. Измерение температуры посредством тепловизора возможно, но здесь необходимо очень тщательно исследовать полученные результаты. Для этого крайне важно выполнять корректную настройку компенсации отраженной температуры (КОТ), поскольку это является одним из основных факторов при расчете температуры.

Корректная настройка коэффициента излучения критически важна при значительной разнице между температурой объекта измерения и рабочей температурой окружающей среды. Когда температура измеряемого объекта выше температуры окружающей среды, то:

- чрезмерно высокий коэффициент излучения приведет к завышенным показаниям температуры;
- чрезмерно низкий коэффициент излучения приведет к заниженным показаниям температуры.

Когда температура измеряемого объекта ниже температуры окружающей среды, то:

- чрезмерно высокий коэффициент излучения приведет к заниженным показаниям температуры;
- чрезмерно низкий коэффициент излучения приведет к завышенным значениям температуры.

Чем больше разница между температурой измеряемого объекта и температурой окружающей среды и чем ниже коэффициент излучения, тем более вероятно возникновение ошибок. Количество таких ошибок увеличивается, если коэффициент излучения задан неверно.

Несмотря на то, что многие материалы, например, стекло кажутся нам прозрачными, они проявляют себя как материалы не пропускающего типа, т.е. устойчивые к длинноволновому инфракрасному излучению.

Если компоненты, расположенные под поверхностью, влияют на распределение температуры по поверхности измеряемого объекта через теплопроводность, структуру внутреннего строения объекта измерения зачастую можно рассмотреть на полученном ИК-изображении/термограмме. Тем не менее, тепловизор может измерять только поверхностную температуру. Точное определение значений температуры внутренних элементов объекта с помощью тепловизора осуществить невозможно.

Точка измерения и расстояние до измеряемого объекта. Существуют три переменных, которые необходимо учитывать при определении оптимального расстояния до измеряемого объекта и максимального видимого и измеряемого объекта:

- поле зрения (FOV);
- наименьший видимый объект (IFOV_{geo}) и наименьший измеряемый объект/измеряемая точка (IFOV_{meas}).

На рис. 5 изображено поле зрения тепловизора.



Рисунок 5 – Поле зрения тепловизора

Поле зрения (FOV) тепловизора представляет собой область, видимую тепловизором. Размеры данной площади определяются объективом. Более того, необходимо знать технические характеристики наименьшего видимого объекта (IFOVgeo) тепловизора. С помощью этого определяется размер пикселя (в зависимости от расстояния). С пространственным разрешением объектива 3,5 мрад и расстоянием до измеряемого объекта 1 м., наименьший видимый объект (IFOVgeo) имеет сторону пикселя, равную 3,5 мм, и отображается на дисплее в качестве одиночного пикселя. Для получения точных результатов измерения измеряемый объект должен быть в 2-3 раза больше наименьшего видимого объекта (IFOVgeo). Следовательно, следующий приближенный подсчет применяется к наименьшему измеряемому объекту (IFOVmeas):

$$\text{IFOVmeas} \approx 3 \times \text{IFOVgeo}.$$

Применение тепловизоров в металлургии

Температура в металлургии – ключевой параметр качества процесса, один из важнейших индикаторов степени развития дефектов в огнеупорных материалах, кессонах, изложницах и других объектах.

В настоящее время контроль температуры в металлургии производится пирометрами, либо контактными термопарными датчиками в ограниченном числе точек объекта. Это не позволяет оперативно выявлять зоны перегрева оборудования, связанные с появлением дефектов различного вида (эрозия и прогары футеровки, пустоты и трещины, локальные изменения теплофизических характеристик газопроницаемости и влагосодержание материалов ограждающих конструкций), координаты появления которых сложно прогнозировать. В то же время современная тепловизионная техника позволяет с высокой степенью достоверности, в реальном времени, дистанционно и бесконтактно получать информацию о распределении температуры по поверхности агрегатов, выявлять различные тепловые аномалии, связанные с отклонением параметров технологических процессов или характеристик материалов от номинальных и своевременно принимать меры по предупреждению аварийных ситуаций.

Тепловизионный мониторинг позволяет продлить сроки эксплуатации и увеличить промежутки между планово-предупредительными ремонтами дорогостоящего оборудования, такого, например, как плавильные печи различного типа, изложницы, конверторы, обжиговые известковые печи, миксеры, формы, кессоны, дымовые трубы, электролизные ванны, энергоустановки различного назначения. Несомненным достоинством тепловизионной технологии контроля является возможность оперативно обнаруживать аварийные утечки из теплопроводов и пульпопроводов, контролировать термическое состояние потери хвостохранилищ, других гидротехнических сооружений

горно-металлургического комбината. Существенно, что тепловизионная цифровая аппаратура позволяет оперативно вводить информацию в ПЭВМ и обрабатывать ее по соответствующим алгоритмам в целях прогноза остаточного ресурса агрегатов, накопления базы данных и анализа дефектоскопических ситуаций.

Характеристика прибора

Прибор FLIR T 420 bx – портативный и точный прибор для измерения температур поверхностей в различных областях промышленности, в том числе в металлургии. Он имеет прочный корпус и снабжен высококачественной цифровой камерой и лазерным целеуказателем, имеет большое количество встроенных функций. Технические данные прибора приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Технические данные прибора FLIR T 420 bx

СОЗДАНИЕ ТЕПЛОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	
Температурная чувствительность/NETD	<45 мК при 30°C
ИК-разрешение	320 × 240 пикселей
Масштабирование	1–4× плавное цифровое с панорамированием
Угол обзора / минимальное фокусное расстояние	25° × 19° / 0.4 м
Спектральный диапазон	7.5 – 13 мкм
Пространственное разрешение (мгновенное поле зрения)	1.36 мрад
Частота обновления изображения	60 Гц
Фокусировка	Автоматическая или ручная
Детектор	Не охлаждаемый микроболометр
ПРОСМОТР ИЗОБРАЖЕНИЯ	
Режимы изображения	ИК/визуальное + Thermal Fusion
Картинка в картинке	ИК-область на визуальном изображении с возможностью изменения размера и перемещения
Дисплей	Встроенный сенсорный экран, цветной ЖК-дисплей 3.5», 320 x 240 пикселей
Thermal Fusion	ИК-изображение отображается на визуальном выше, ниже или в пределах температурного интервала
ИЗМЕРЕНИЯ	
Диапазон температур предмета	От –20 °C до +1200 °C
Погрешность	±2°C или 2% от показания
АНАЛИЗ ИЗМЕРЕНИЙ	
Экспонометр	5
Область	5 окон с макс./мин./сред.
Изотерма	Выше/ниже заданного уровня/интервал
Автоматическое обнаружение горячих/холодных участков	Экспонометр для горячих или холодных участков: автоматическая маркировка в области
Поправка на коэффициент излучения	Варьируется от 0.01 до 1.0 или выбирается из перечня материалов
Поправки измерений	Отраженная температура, пропускание оптики и пропускание атмосферы

Поправка на внешнюю оптику/окна	Автоматически, на основе входных значений пропускания оптики/окна и температуры
Разность температур	Разница температур между функциями измерений или референтной температурой
Сигнализация для функции измерения	Звуковая/визуальная сигнализация (выше/ниже) для экспонетра, окна или разницы температур
НАСТРОЙКА	
Цветовые палитры	Ч/Б, Ч/Б инв., серая, радуга, радуга высокого контраста
Параметры настройки	Локальная настройка единиц измерения, языка, формата даты и времени, автоматического отключения и яркости экрана
ХРАНИЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ	
Тип	Карта памяти SD
Формат файла	Стандартный JPEG, включая данные измерений
Режимы	ИК/визуальные изображения, одновременное хранение ИК и визуальных изображений
Периодическое сохранение изображений	Каждые 7 сек до 24 часов (ИК); Каждые 14 сек до 24 часов (ИК и визуальный)
КОММЕНТАРИЙ К ИЗОБРАЖЕНИЯМ	
Текст	Текст из готового перечня или клавиатуры на сенсорном экране
MeterLink	Подключение токоизмерительных клещей Meter EX845 или измерителя влажности Meter MO297 через Bluetooth
Эскиз	С помощью сенсорного экрана
Голосовые	60 секунд через Bluetooth®
Маркеры изображений	Мгновенный Отчет (.pdf файл); отдельное программное обеспечение ПК с обширными функциями отчета
ЦИФРОВАЯ КАМЕРА	
Встроенная цифровая камера	3.1 мегапиксела (2048 × 1536 пикселей) и два светодиода
ЛАЗЕРНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ	
Лазер	Полупроводниковый диодный лазер AlGaInP, класс 2
Отображение лазерного указателя	Положение отображается автоматически на ИК-изображении
ПОТОКОВОЕ ВИДЕО	
Радиометрическое потоковое ИК-видео	MPEG-4 на ПК через USB
Не радиометрическое потоковое ИК-видео или визуальная запись	MPEG4 в карту памяти
Не радиометрическое потоковое ИК-видео или визуальная запись потока	Несжатое цветное видео, через USB
ПИТАНИЕ	
Тип аккумулятора	Перезаряжаемая ионно-литиевая батарея с заменой на месте
Время работы от аккумулятора	4 часа

Зарядная система	Встроенная, адаптер переменного тока, двухсекционное зарядное устройство или 12В от автомобиля
Управление электропитанием	Автоматическое отключение и режим сна (может выбрать пользователь)
ПАРАМЕТРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ	
Диапазон рабочих температур	От -15 °С до +50 °С
Диапазон температур при хранении	От -40 °С до +70 °С
Влажность (эксплуатация и хранение)	IEC 60068-2-30/24 ч. 95% относительная влажность от +25 °С до +40 °С / 2 цикла
Устойчивость к ударам	25 g (IEC 60068-2-29)
Устойчивость к вибрации	2 g (IEC 60068-2-6)
Радио-спектр	ETSI EN 300 328; FCC Part 15.247; RSS-210
Корпус	Корпус камеры и объектива: IP 54 (IEC 60529)
Безопасность	EN/UL/CSA/PSE 60950-1
ИНТЕРФЕЙСЫ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ	
Интерфейсы	USB-мини, USB-A, Bluetooth, Wi-Fi, composite video
USB	USB-A; USB мини-B: Перенос данных на и с ПК / потоковое видео
Bluetooth	Коммуникация с наушниками и внешним датчиком
WiFi	Беспроводная передача данных на смартфон или планшетный ПК
РАДИО	
Wi-Fi	Стандарт: 802.11 b/g; частотный диапазон: 2412-2462 МГц; максимальная выходная мощность: 15 dBm
Bluetooth	Частотный диапазон: 2402-2480 МГц
ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ	
Вес камеры, включая батарею	0.88 кг

Внешний вид и кнопки управления прибором изображены на рис. 6.



Рисунок 6 – Внешний вид и кнопки управления тепловизором FLIR T 420 bx:

A1 – сенсорный ЖК-дисплей; A2 – антенна для беспроводной связи; A3 – кнопка цифрового зума; A4 – кнопка программного управления; A5 – джойстик для перемещения по меню, диалоговым окнам и архиву изображений; A6 – кнопка меню; A7 – кнопка выбора режимов работы; A8 – кнопка выбора режимов настройки; A9 – кнопка архивирования; A10 – кнопка включения-отключения устройства; A11 – наручный ремешок; B1 – кнопка лазерного целеуказателя; B2 – кнопка предпросмотра и сохранения изображения; B3 – кнопка ручной фокусировки; B4 – точка крепления шейного ремешка; B5 – видеоподсветка; B6 – объектив цифровой камеры; B7 – кнопка защелки дополнительных инфракрасных объективов; B8 – лазерный целеуказатель; B9 – инфракрасный объектив.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Установка состоит из лабораторной электрической печи, температурный режим в которой поддерживается контроллером. В рабочем пространстве печи помещены образцы, температура поверхности которых контролируется термопарами. Вторичный многоканальный прибор служит для отображения температур образцов и имеет выход на персональный компьютер. Для бесконтактного измерения температуры в лабораторном практикуме используют переносной пирометр.

Печь имеет муфельную конструкцию со встроенными в футеровку нагревательными элементами резистивного типа. Для того, чтобы избежать коррозии, печь изготовлена из нержавеющей стали. Ниже двери имеется полка, изготовленная также из нержавеющей стали, которая предохраняет рабочую электронику от термических и механических повреждений. Вытяжное устройство, изготавливаемое из нержавеющей стали, устанавливается с задней стороны печи.

Нагревательные спирали уложены в волокнистый муфель. Нагрев рабочего пространства муфеля осуществляется с трёх сторон, что обеспечивает высокую равномерность. Вмонтированные нагревательные элементы в волокнистый изолятор позволяют достигать экстремально короткие циклы нагрева и охлаждения при низком энергопотреблении. Энергопотребление уменьшается примерно на 40 %.

Печь оснащается термопарой, которая вставляется в муфель и служит датчиком температурного контроллера.

На основном дисплее контроллера можно выбрать следующие строки меню:

- в первой строке: ACTUAL VALUE (текущее значение);
- во второй строке: SET VALUE (установить значение).

Возможна ситуация, когда при включении контроллера печь начинает нагреваться и сообщение PRG загорится КРАСНЫМ. Это происходит в том случае, когда стартует существующая программа, т.е. если программа, по которой производилась термообработка в предыдущий раз, не была полностью завершена. В этом случае необходимо кратковременно нажать кнопку **F** и $\downarrow$, что вызовет завершение программы, красная надпись **PRG** перестанет гореть.

Таблица 5

Рабочий диапазон измеряемых температур для термопар

Тип ТП	Рабочий диапазон	Тип ТП	Рабочий диапазон
ХА(К)	-100°C...1350°C	ПР(В)	400°C...1800°C
ХК(Л)	-50°C...770°C	НН(Н)	-200°C...1300°C
ПП(С)	0°C...1760°C	ВР-А1	0°C...2500°C
ЖК(Ж)	-50°C...1120°C	ВР-А2	0°C...1800°C
МК(Т)	-120°C...400°C	ВР-А3	0°C...1800°C
ПП(Р)	0°C...1760°C		

Таблица 6

Рабочий диапазон измеряемых температур для термометров сопротивления

Тип ТС	W ₁₀₀	Рабочий диапазон
Pt	1,385	-200°C...500°C
Cu	1,428	-200°C...200°C
Pt доп.	1,391	-200°C...500°C
Cu доп.	1,426	-50°C...200°C
Ni	1,617	-60°C...180°C
R(Ом)	Измерение сопротивления 20...150 Ом	

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ, ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Подготовка к эксперименту пирометра

Не включая лабораторной установки, рассмотрите устройство пирометра, определите марку, пределы измерения, показатель визирования. Занесите эту информацию в отчет по лабораторной работе.

Прежде чем начать эксперимент, необходимо определить диаметр пятна визирования. Для этого следует измерить расстояние от точки предполагаемого измерения перед раскрытой дверцей нагревательной печи до различных образцов, находящихся в рабочем пространстве. Пользуясь рис. 1, рассчитайте диаметр пятна визирования. Убедитесь в том, что образцы лабораторной установки имеют размер больший, чем пятно визирования. Включите пирометр, переведите его в режим измерения и установите степень черноты измеряемого объекта, равную единице.

Проведение эксперимента

- 1) Поместите в лабораторную печь изучаемые объекты с зачеканенными на наружной поверхности термопарами. Выведите свободные концы термопар через отверстие в задней стенке печи и подключите их к многоканальному измерителю температуры через промежуточную клеммную коробку. При подключении термопар необходимо соблюдать полярность!
- 4) Включите персональный компьютер, в меню «Основной экран» регулятора температуры выбрать пункт «Все каналы».
- 5) В меню «Настройка» необходимо найти пункт «Добавить самописец» и выбрать датчики, подключенные к изучаемым объектам. При выборе датчика открывается окно самописца, в котором будет отображаться график изменения температуры выбранного датчика.

Таблица 7 – Измерение температуры образцов контактным методом

№ образца	Среднеарифметическое значение температуры, показанное термопарой, °C	Среднеарифметическое значение температуры, показанное пирометром, °C	Степень черноты материала, установленная в пирометре	Степень черноты материала по данным табл. 2
№ 1				
№ 2				
№ 3				

Проанализируйте полученные вами результаты и сделайте выводы.

- 6) Включите лабораторную печь и прогрейте ее до заданной преподавателем температуры. Откройте дверцу печи и произведите измерение температуры объектов пирометром, работающим в автоматическом режиме. При включенном режиме автоматической работы с памятью от момента нажатия до момента отпускания курка в память записывается непрерывный ряд измерений. Для образцов подберите с помощью задатчика значение степени черноты таким образом, чтобы показания контактного и бесконтактного методов измерения были бы максимально близкими друг к другу. Полученные экспериментальные данные занесите в строчку табл. 8. Постройте график измеренной температуры бесконтактным и контактным способом по времени. Для этого экспортируйте данные контактного метода измерения и данные из памяти пирометра. Определите для каждой экспериментальной точки абсолютную погрешность измерения $\Delta = t_m - t_{нпр}$.

Таблица 8– Измерение температуры образцов контактным и бесконтактным методом для образца №__ при установленной в пирометре степени черноты $\varepsilon = \underline{\hspace{2cm}}$

Время	Показания термопары $t_m, ^\circ\text{C}$	Показания пирометра $t_{\text{пир}}, ^\circ\text{C}$	Абсолютная погрешность измерения Δ , $^\circ\text{C}$	Приведенная погрешность измерения γ , %

Используя полученное значение абсолютной погрешности, определите приведенную погрешность по формуле

$$\gamma = (\Delta t / T_n) \cdot 100, \%$$

где T_n – нормирующее значение, равное разности между верхним и нижним пределами диапазона измерения пирометра.

Содержание отчета по лабораторной работе

В отчёт должны быть включены следующие разделы:

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

Лабораторная работа № 9

Теплопроводность при нестационарном режиме

Цель работы

На лабораторных занятиях следует изучить влияние температуры в печи и суммарного коэффициента теплоотдачи на продолжительность нагрева цилиндрической заготовки до заданной температуры ее поверхности, а также на время нагрева до заданного перепада температур между поверхностью и осью цилиндра.

Краткие сведения из теории

Рассмотрим процесс распространения тепла внутри твердого тела, находящегося в тепловом взаимодействии с окружающей средой. Согласно постулату Фурье, величина и направление вектора плотности теплового потока в каждой точке тела полностью определяются распределением температуры в объеме тела, поэтому основной задачей теории теплопроводности является определение температурного поля. Для решения этой задачи запишем *дифференциальное уравнение теплопроводности*, которое получим из уравнения энергии:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla (\lambda \nabla T),$$

или при условии постоянства коэффициента теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T, \quad (1)$$

где $a = \lambda / (c\rho)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Полученное уравнение позволяет уточнить смысл коэффициента температуропроводности применительно к нестационарным процессам теплопереноса: чем больше величина a , тем быстрее происходит перестройка (например, выравнивание) температурного поля в теле. Таким образом, коэффициент температуропроводности характеризует термоинерционные свойства материала, что и естественно, так как эта величина обратно пропорциональна объемной теплоемкости материала $c\rho$, Дж/(м³К).

Вопрос об условиях однозначности рассмотрим применительно к уравнению теплопроводности (1). Это уравнение имеет бесчисленное множество решений, соответствующих бесчисленному классу явлений теплопроводности. Чтобы из этого множества решений выделить одно, соответствующее единичному явлению данного класса, необходимо задать условия однозначности, включающие в себя:

- геометрические условия, определяющие форму и размеры тела;
- физические параметры материала (коэффициент теплопроводности, удельную теплоемкость, плотность);
- начальные условия, т. е. распределение температуры в объеме тела в некоторый момент времени $t = 0$, принимаемый за начало отсчета;
- граничные условия, характеризующие тепловое взаимодействие поверхности тела с окружающей средой.

Начальные и граничные условия объединяются термином "краевые условия".

Начальное условие записывается в следующем виде:

$$T(x, y, z, 0) = T_i(x, y, z),$$

где $T_i(x, y, z)$ – заданное по условию начальное распределение температуры тела.

Например, для плоской пластины толщиной δ , равномерно прогретой в начальный

момент времени до температуры T_n , начальное условие имеет вид: $T(x, 0) = T_n$.

Граничные условия могут быть заданы тремя различными способами.

1) Граничные условия первого рода. В этом случае задается распределение температуры по всей поверхности тела и изменение этого распределения во времени, т. е. задается функция

$$T_w = T_w(x, y, z, t).$$

В частном случае эта температура может быть постоянной во времени, а кроме того, и неизменной по всей поверхности тела.

Граничные условия третьего рода являются наиболее общим и часто встречающимся на практике случаем. В этом случае задаются температура окружающей среды T_0 и закон теплообмена между окружающей средой и поверхностью тела. По существу при этом задается некоторая связь между известной температурой окружающей среды и неизвестными температурой поверхности тела и градиентом температуры на этой поверхности. Например, если внешний теплообмен между окружающей средой и поверхностью тела с температурой T_w осуществляется путем конвективной теплоотдачи, плотность теплового потока, подводимого к поверхности тела (или отводимого от нее) выражается с помощью формулы Ньютона как величина, пропорциональная разности первых степеней температур среды и поверхности тела, т. е. $q_w = \alpha(T_0 - T_w)$, где α – коэффициент теплоотдачи. С другой стороны, согласно постулату Фурье

$$q_w = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w,$$

где n — координата, направленная по внутренней нормали к поверхности тела.

Приравнявая на основании закона сохранения энергии правые части этих двух выражений, получим математическую формулировку граничных условий третьего рода для случая конвективной теплоотдачи на поверхности тела:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = \alpha(T_0 - T_w).$$

Решение задачи теплопроводности имеет вид зависимости температуры от координаты x , времени t и шести параметров: характерного размера l , коэффициента теплопроводности λ , коэффициента температуропроводности a , коэффициента теплоотдачи α , начальной температуры тела T_i и температуры окружающей среды T_0 :

$$T = T(x, t, l, \lambda, a, \alpha, T_i, T_0).$$

Для нахождения обобщенного решения, описывающего группу подобных температурных полей, приведем систему уравнений к безразмерному виду. Для этого введем

безразмерную координату $X = x/l$ и безразмерную избыточную температуру $\theta = (T_0 - T)/(T_0 - T_i)$. Получим:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2}; \tag{2}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=0} = 0; \tag{3}$$

$$\theta(X, 0) = 1; \tag{4}$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial X} \Big|_{X=1} = Bi \theta \Big|_{X=1}. \tag{5}$$

Здесь $Fo = at/l^2$ – число Фурье, представляющее собой безразмерную форму времени; $Bi = \alpha l / \lambda$ – критерий Био, мера термической массивности тел.

Решение системы уравнений (2) ... (5), имеет вид зависимости безразмерной избыточной температуры от безразмерной координаты, безразмерного времени и *всего одного* безразмерного параметра, т.е.

$$\theta = \theta(X, Fo, Bi).$$

Таким образом, необходимым и достаточным условием подобия температурных полей в бесконечных плоских пластинах, т.е. равенства безразмерной температуры ($\theta = \text{idem}$) в сходственных точках ($X = \text{idem}$) в сходственные моменты времени ($Fo = \text{idem}$), являются одинаковые значения критерия Био ($Bi = \text{idem}$).

Для прояснения физического смысла критерия Био представим его в виде $\alpha/(\lambda/l)$. В числителе этого выражения стоит коэффициент теплоотдачи α , характеризующий интенсивность внешнего теплообмена, т. е. теплоотдачи от среды к поверхности тела. В знаменателе стоит величина отношения коэффициента теплопроводности к характерному размеру тела. Эта величина характеризует интенсивность внутреннего теплообмена между поверхностью тела и его внутренними слоями. Таким образом, критерий Био представляет собой отношение интенсивностей процессов внешнего и внутреннего теплообмена.

С другой стороны, критерий Био может быть представлен в виде $(l/\lambda)/(1/\alpha)$. Из этого выражения следует, что критерий Био представляет собой отношение внутреннего теплового сопротивления к наружному.

Обе эти формулировки позволяют сделать вывод о том, что критерий Био определяет характер распределения температуры в объеме нагреваемого тела. Чем больше эта величина, тем больше интенсивность внешнего теплообмена по сравнению с интенсивностью внутреннего, или, что то же самое, тем больше внутреннее тепловое сопротивление по сравнению с наружным.

Таким образом, бóльшим значениям критерия Био должна соответствовать меньшая равномерность распределения температуры в объеме тела. В предельном случае $Bi \rightarrow \infty$ (практически при $Bi > 100$) интенсивность внешнего теплообмена настолько велика, т. е. наружное тепловое сопротивление настолько мало, что поверхность тела мгновенно принимает температуру окружающей среды. В результате, заданной величиной оказывается уже температура поверхности тела, т. е. получаем задачу с граничными условиями первого рода. В рассматриваемом случае это означает, что в момент времени $t = 0$ температура поверхности пластины мгновенно достигает заданного значения T_0 и в дальнейшем остается постоянной.

И наоборот, чем меньше величина критерия Био, тем равномернее распределена температура в объеме тела на протяжении всего периода нагрева, так как подводимый к поверхности тепловой поток интенсивно отводится к внутренним слоям тела. При $Bi \rightarrow 0$ (практически при $Bi < 0,25$) тело, называемое в этом случае *термически тонким*, нагревается, будучи в каждый момент времени равномерно прогретым. Коэффициенты для расчета времени нагрева (охлаждения) и температурного поля неограниченного цилиндра при граничных условиях III рода приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Коэффициенты для расчета времени нагрева (охлаждения) и температурного поля неограниченного цилиндра при граничных условиях III рода

Bi	μ^2	$P_{\text{ц}}$	$M_{\text{ц}}$	$N_{\text{ц}}$
0,00	0,000	1,000	1,000	1,000
0,01	0,020	0,997	1,000	1,002
0,10	0,195	0,975	1,000	1,025
0,20	0,381	0,951	0,999	1,048
0,30	0,557	0,927	0,998	1,071
0,40	0,725	0,904	0,997	1,093
0,50	0,885	0,881	0,995	1,114
0,60	1,037	0,859	0,993	1,134
0,70	1,182	0,837	0,992	1,154
0,80	1,320	0,816	0,989	1,172
0,90	1,452	0,796	0,987	1,190
1,00	1,577	0,776	0,984	1,207
1,50	2,123	0,686	0,970	1,281
2,00	2,558	0,610	0,953	1,338
3,00	3,199	0,492	0,923	1,419
4,00	3,641	0,407	0,895	1,470
5,00	3,959	0,345	0,872	1,503
10,00	4,750	0,191	0,804	1,568
15,00	5,066	0,130	0,772	1,585
20,00	5,235	0,099	0,754	1,592
30,00	5,411	0,066	0,736	1,596
40,00	5,501	0,050	0,724	1,599
50,00	5,557	0,040	0,718	1,600

Порядок выполнения лабораторной работы

В печь с температурой $t_{\text{печ}}$ помещают длинный стальной цилиндр диаметром d . В момент загрузки в печь температура металла была равномерна по всему сечению и составляла $t_{\text{нач}}$. Физические свойства стали принять постоянными, не изменяющимися с температурой. Определить время нагрева τ до заданной температуры поверхности $t_{\text{пов}}$, а также температуру на оси t_c неограниченного цилиндра в момент окончания нагрева.

1. Откройте файл *03расчет (нестационарность).xls*. При открытии файла **необходимо в обязательном порядке подключить макросы!**
2. В соответствии с выбранным номером варианта (таблица 2) занести исходные данные для расчета (рисунок).
3. Для установления необходимого перепада между центром и поверхностью цилиндра следует занести в ячейку «Перепад» значение и нажать кнопку «Расчет времени нагрева».
4. Изучить влияние температуры в печи и суммарного коэффициента теплоотдачи на продолжительность нагрева цилиндрической заготовки до заданной температуры ее поверхности.
5. Изучить влияние температуры в печи и суммарного коэффициента теплоотдачи на время нагрева до заданного перепада температур между поверхностью и осью цилиндра.

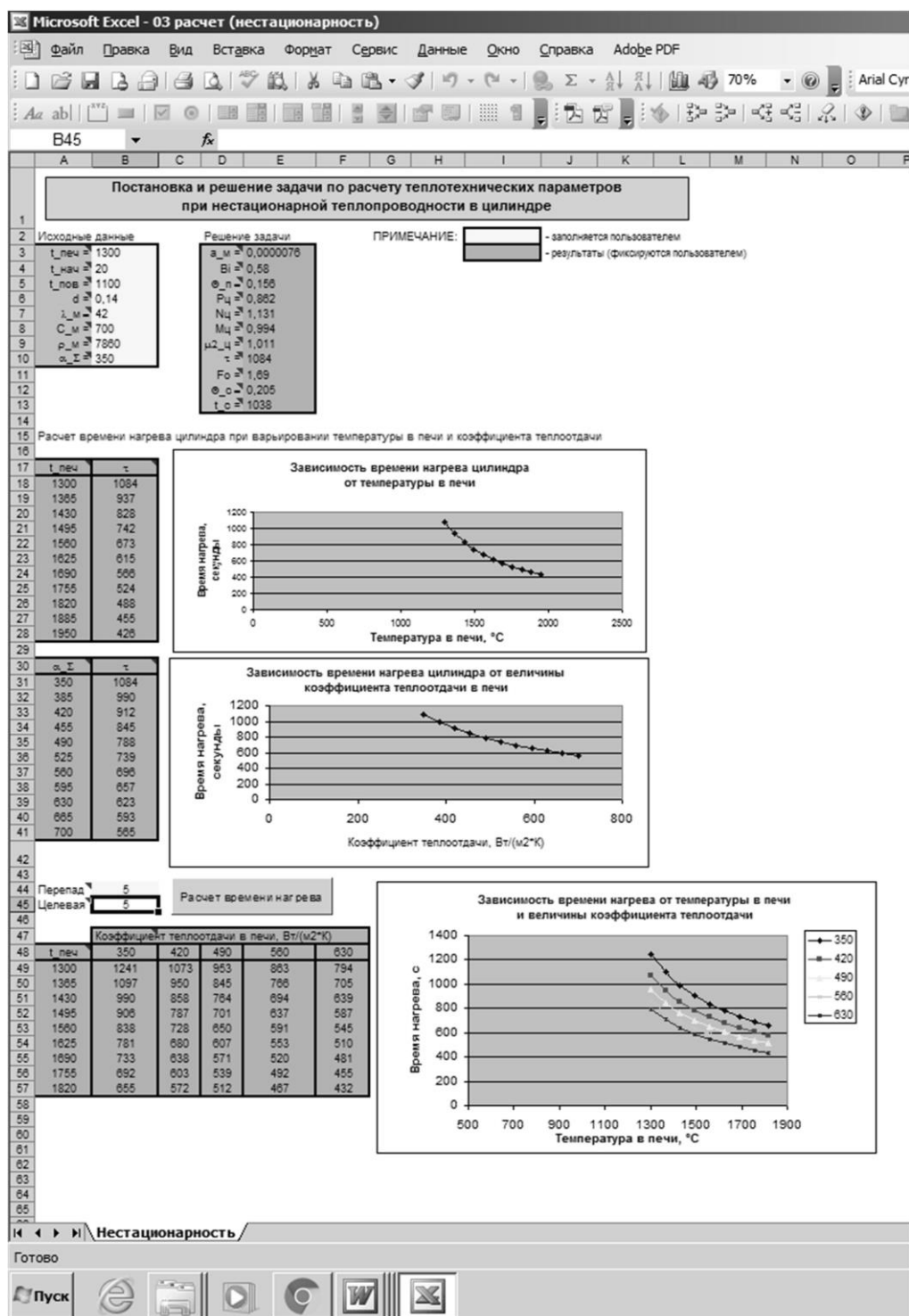


Рисунок – экранная форма программы расчета

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

Виртуальная лабораторная работа № 10

Теплопередача

Цель работы

Целью работы является расчет коэффициентов теплопередачи в теплообменнике «труба в трубе»

Задачи работы:

1. Закрепление сведений о физической сущности переноса теплоты от горячего теплоносителя к холодному и анализ факторов, влияющих на этот процесс.
2. Определение коэффициентов теплопередачи в рекуперативных теплообменниках при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителя.

Краткие сведения из теории

Теплообменными называют аппараты, предназначенные для передачи теплоты от одного теплоносителя к другому. Один из теплоносителей теплообменника имеет более высокую температуру (греющая среда), другой – более низкую (нагреваемая среда). Теплообменники нашли широкое распространение в различных отраслях промышленности.

Тепловая работа теплообменных аппаратов будет в первую очередь определяться схемой движения теплоносителей в нем. Наиболее распространенная схема – противоточная, когда горячий и холодный потоки движутся навстречу друг другу. При прямоточной схеме реализуется параллельное движение потоков греющей и нагреваемой сред в аппарате. Необходимо отметить, что в случае прямотока так же, как и для противотока, положение температурных кривых на графике зависит от соотношения теплоемкостей потоков греющей и нагреваемой сред.

Теплоносители при движении внутри корпуса аппарата не смешиваются друг с другом, так как они разделены плотной стенкой.

Особое значение имеет и величина теплоемкости греющего и нагреваемого потоков W_z и W_x , Вт/К:

$$W_z = c_z V_z; W_x = c_x V_x,$$

где c_z, c_x – теплоемкость теплоносителей 1 и 2, Дж/(м³·К);

V_z, V_x – расход теплоносителей 1 и 2, м³/с.

Основными для теплового расчета теплообменных аппаратов в случае стационарного теплового режима служат уравнения теплового баланса и теплопередачи.

Тепловой поток Q , Вт, отданный в теплообменнике горячим теплоносителем, может быть определен через известные температуры на входе t'_z и на выходе t''_z и массовый расход m_z , кг/с:

$$Q = m_z (c'_z t'_z - c''_z t''_z), \quad (1)$$

где c'_z, c''_z , Дж/(кг·К) – теплоемкости горячего теплоносителя на входе и выходе из теплообменника.

Холодный теплоноситель получит несколько меньшее количество теплоты, чем отдаст горячий, так как неизбежны потери в окружающее пространство через стенки. Для различных конструкций эти потери различны и составляют от 1 до 10%. Для оценки введем коэффициент сохранения теплоты $\xi = 0,9...0,99$. С учетом коэффициента сохранения теплоты определим тепловой поток, полученный холодным теплоносителем в теплообменном аппарате:

$$\xi Q = m_x (c''_x t''_x - c'_x t'_x), \quad (2)$$

где c'_x, c''_x , Дж/(кг·К) – теплоемкости холодного теплоносителя на входе и выходе из теплообменника;

m_x , кг/с – массовый расход холодного теплоносителя;

t'_x, t''_x – температуры холодного теплоносителя на входе и выходе из теплообменного аппарата.

Уравнение теплопередачи связывает тепловой поток Q с площадью теплообменной поверхности F , m^2 , коэффициентом теплопередачи k , Вт/($m^2 \cdot K$) и средним температурным напором $\overline{\Delta t}$ (разностью между температурами теплоносителей) в теплообменнике:

$$Q = k \overline{\Delta t} F \quad (3)$$

Обычно при расчете теплообменных аппаратов наиболее сложным моментом является определение коэффициента теплопередачи k . Для большинства теплообменников можно рекомендовать рассчитывать этот коэффициент с использованием формулы для плоской стенки, так как используемые в них трубы имеют отношение толщины стенок к диаметру менее 0,1:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\Sigma 1}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\Sigma 2}}}, \quad (4)$$

где $\alpha_{\Sigma 1}, \alpha_{\Sigma 2}$ – соответственно суммарные коэффициенты теплоотдачи от горячего теплоносителя к стенке и от стенки к холодному теплоносителю, Вт/($m^2 \cdot K$);

$\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}$ – сумма термических сопротивлений стенки.

Величина среднего температурного напора $\overline{\Delta t}$ определяет разность температур теплоносителей по всей площади теплообменной поверхности. Учитывая характер изменения температур теплоносителей при противотоке и прямотоке, для определения $\overline{\Delta t}$ при любой схеме движения теплоносителей:

$$\overline{\Delta t} = \frac{\Delta t_{\text{нач}} - \Delta t_{\text{кон}}}{\ln \frac{\Delta t_{\text{нач}}}{\Delta t_{\text{кон}}}}, \quad (5)$$

$\Delta t_{\text{нач}} = t'_r - t''_x$ – начальный температурный напор для противотока;

$\Delta t_{\text{нач}} = t'_r - t'_x$ – начальный температурный напор для прямотока;

$\Delta t_{\text{кон}} = t''_r - t'_x$ – конечный температурный напор для противотока;

$\Delta t_{\text{кон}} = t''_r - t''_x$ – конечный температурный напор для прямотока.

Описание виртуальной лабораторной установки

Принципиальная схема виртуальной лабораторной установки показана на рисунке. Основным элементом установки является теплообменник «труба в трубе» **1** рабочей длиной $L=0,45$ м, по внутренней трубе которого наружным диаметром $d=0,0222$ м подается подогретая вода (горячий теплоноситель) из водонагревателя **2**, имеющего три ступени мощности. Температура горячего теплоносителя контролируется измерительными приборами **3**. Расход горячего теплоносителя задают циркуляционным насосом **5** и контролируют измерителем **6**. Во внешний контур теплообменника **1**, представляющий из себя кольцевой канал, подается подогреваемая вода (холодный теплоноситель). Для реализации схемы противотока включают насос **7** и контролируют расход холодного теплоносителя измерителем **8**. Для прямоточной схемы движения

теплоносителей используют насос **9** и измерительный прибор **10**. График изменения температур теплоносителей можно просмотреть на мониторе **11**.

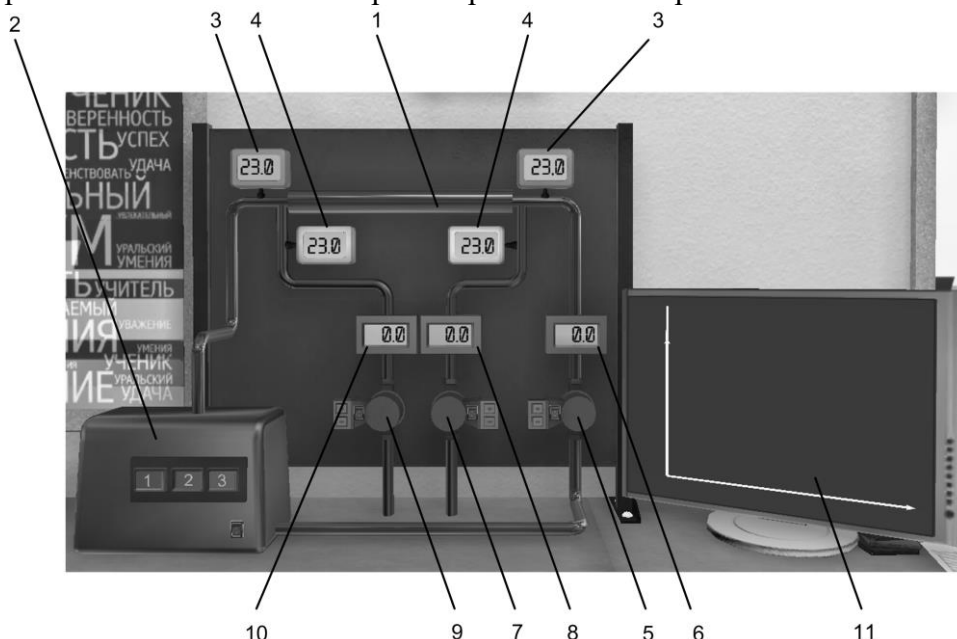


Рисунок – Схема виртуальной лабораторной установки

Порядок подготовки и выполнения виртуального эксперимента

1. Ознакомиться с заданием на выполнение эксперимента, записать параметры, которые необходимо установить на виртуальных приборах. Подготовить таблицу для записи результатов виртуального эксперимента:

Мощность водонагревателя (номер опыта)	РЕЖИМ ПРОТИВОТОКА			
	Температура горячего теплоносителя		Температура холодного теплоносителя	
	На входе	На выходе	На входе	На выходе
1				
2				
3				
Мощность водонагревателя (номер опыта)	РЕЖИМ ПРОТИВОТОКА			
	Температура горячего теплоносителя		Температура холодного теплоносителя	
	На входе	На выходе	На входе	На выходе
1				
2				
3				

2. Включить насос холодного теплоносителя **7** для реализации противоточной схемы и установить заданный расход.
3. Включить насос горячего теплоносителя **5** и отрегулировать заданный расход воды.
4. Включить водонагреватель **2** и нажать на кнопку выбора режима его работы.
5. Убедиться в том, что все заданные параметры верны, и включить кнопку «Начать работу».
6. Наблюдая за изменением температур теплоносителей при помощи измерительных приборов **3** и **4**, монитора **11**, дождаться установления стационарного режима.
7. После установления стационарного режима записать температуры горячего и холодного теплоносителей.

8. Последовательно увеличивая мощность водонагревателя, проделать опыты 2 и 3, результаты занести в таблицу.
9. Выключить насос холодного теплоносителя **7**, включить насос **9** для реализации прямоточной схемы и установить заданный расход.
10. Провести опыты для прямоточной схемы движения теплоносителей с различной мощностью водонагревателя и полученные результаты температур занести в таблицу.

Обработка результатов

При обработке результатов рекомендуется все расчеты проводить в системе единиц СИ.

1. Определить площадь теплообменной поверхности теплообменника «труба в трубе» по формуле

$$F = \pi dL, \text{ м}^2,$$

где $d=0,0222$ м – наружный диаметр внутренней трубы теплообменника, м; $L=0,45$ м – длина теплообменника, м.

2. Определить массовый расход горячего и холодного теплоносителей

$$m = V\rho, \text{ кг/с}$$

где V – объемный расход теплоносителя, м³/с; ρ – плотность воды, определяемой по таблице Приложения.

3. Для каждого опыта рассчитать среднеарифметическое значение температуры горячего и холодного теплоносителей.
4. Для каждого опыта по формуле (1) определить тепловой поток, передаваемый от горячего теплоносителя к холодному. По формуле (2) рассчитать коэффициент сохранения теплоты в теплообменнике.
5. Для каждого опыта с помощью зависимости (5) найти значение среднего температурного напора $\overline{\Delta t}$.
6. Для каждого опыта по формуле (3) рассчитать коэффициент теплопередачи k .
7. Занести полученные значения в итоговую форму программы. Целую и дробную часть полученных значений необходимо разделять точкой.

Содержание отчета по лабораторной работе

1. Цель работы.
2. Схема и описание установки, фотография экрана в ходе эксперимента.
3. Методика исследования, включая расчётные формулы с расшифровкой входящих в них величин.
4. Таблица результатов измерений и расчётов.
5. Математическая обработка результатов измерений.
6. Выводы по проведенной работе.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица – теплофизические свойства воды в зависимости от температуры

Температура, °С	Плотность ρ , кг/м ³	Средняя теплоемкость c , Дж/(кг·К)
0	999,8	4212,0
10	999,7	4205,8
20	998,2	4196,8
30	995,6	4196,8
40	992,2	4193,8
50	988,0	4191,8
60	983,2	4191,0
70	977,8	4191,2
80	971,8	4192,5
90	965,3	4194,9
100	958,4	4198,2