

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Вятский государственный агротехнологический университет
Инженерный факультет

Кафедра тепловых двигателей, автомобилей и тракторов

ТЕПЛОТЕХНИКА

**Журнал для выполнения
лабораторных работ по дисциплине «Теплотехника»
для студентов инженерного факультета,
обучающихся по направлениям подготовки:
23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических
машин и комплексов,
23.03.01 Технология транспортных процессов**

Группа _____

Студент _____

20 __ / 20 __ уч. год

Киров 2021

УДК 521.1: 658.264

Вылегжанин П.Н., Лопарев А.А., Лопатин О.П. Теплотехника: Журнал для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Теплотехника» для студентов инженерного факультета, обучающихся по направлениям подготовки: 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов. 23.03.01 Технология транспортных процессов. - Киров: Вятский ГАТУ, 2021. - 23 с.

Рецензенты: доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения ФГБОУ ВО «Вятский государственный университет» С.А. Плотников;
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых двигателей автомобилей и тракторов ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ Р.Р. Деветьяров.

Журнал рассмотрен и рекомендован к печати учебно-методической комиссией инженерного факультета Вятского ГАТУ (протокол № 5 от 26.01.2021 г.).

Журнал предназначен для студентов, обучающихся по направлениям подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, 23.03.01 Технология транспортных процессов.

© ФГБОУ ВО Вятский ГАТУ, 2021
© П.Н. Вылегжанин, А.А. Лопарев, О.П. Лопатин, 2021

Лабораторная работа № 1

ОБРАБОТКА ИНДИКАТОРНЫХ ДИАГРАММ

Цель работы

Задачи работы

Обработка индикаторных диаграмм

Таблица 1 - Результаты обработки индикаторной диаграммы

α°	y_x , мм	P_{ax} , МПа	lgP_{ax}	A	V_c , см ³	V_x , см ³	V_c+V_x , см ³	$lg(V_c+V_x)$
300								
310								
320								
330								
340								
350								
360								
370								
380								
390								
400								
410								
420								
430								
440								
450								
460								
470								
480								
490								
500								

Соответствующие объемы цилиндра (через каждые 10 мм) определяются по формуле:

$$V_x = \frac{\pi D^2}{4} \cdot A \cdot R.$$

Проводим через точки разбивки перпендикуляры до пересечения с линиями индикаторной диаграммы и определяем масштаб давления по формулам

$$\mu_p = \frac{P}{h},$$

$$\mu_p = y_x \mu_p.$$

Абсолютные давления точек, лежащих на линии индикаторной диаграммы, будут равны:

$$P_{ax} = P_x + 0,1, \text{ МПа.}$$

Рабочий объем цилиндра определяется по уравнению:

$$V_h = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S_n, \text{ см}^3.$$

Объем камеры сжатия V_c определяется по уравнению:

$$V_c = \frac{V_h}{\varepsilon - 1}, \text{ см}^3.$$

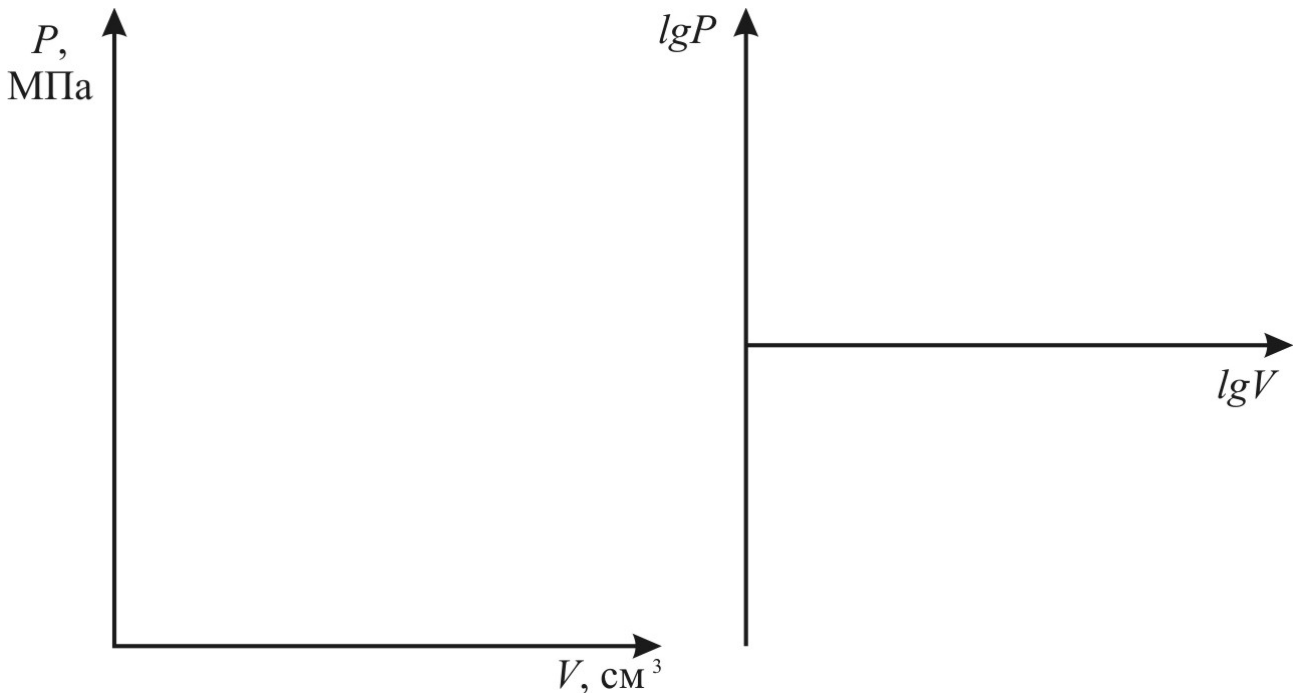


Рисунок 1.1 – Свернутые индикаторные диаграммы

Определив площадь F индикаторной диаграммы в системе координат PV , подсчитываем среднее индикаторное давление P_i по уравнению:

$$P_i = \frac{F}{H} \mu_{инд} - 0,3, \text{ МПа.}$$

Определяем индикаторную мощность:

$$N_i = P_i \cdot V_h \cdot n \cdot i / (30 \cdot \tau_{де}), \text{ кВт.}$$

Мощность механических потерь определяется из выражения:

$$N_m = P_m V_h \cdot n \cdot i / (30 \tau_{де}), \text{ кВт.}$$

Эффективная мощность, снимаемая с коленчатого вала, меньше индикаторной на величину мощности, затрачиваемой на преодоление механических потерь:

$$N_e = N_i - N_m, \text{ кВт.}$$

Среднее эффективное давление можно представить как разность между средним индикаторным давлением и средним давлением механических потерь:

$$P_e = P_i - P_m, \text{ МПа.}$$

Индикаторный КПД определяется по формуле:

$$\eta_i = 3,6 \cdot 10^3 / (g_i \cdot Q_H).$$

Механический КПД определяется по формуле:

$$\eta_m = N_e / N_i.$$

Эффективный КПД определяется по формуле:

$$\eta_{э} = \eta_i \eta_m.$$

Эффективный удельный расход топлива находим из выражения:

$$g_e = \frac{3,6 \cdot 10^3}{\eta_{э} \cdot Q_H}, \text{ г/кВт}\cdot\text{ч.}$$

Показатели политроп сжатия и расширения определяются по уравнениям:

$$n_1 = \operatorname{tg} \alpha_1, \quad n_2 = \operatorname{tg} \alpha_2.$$

Выводы по работе: _____

Лабораторная работа № 2

СНЯТИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА ДВС

Цель работы

Задачи работы

Снятие энергетического баланса ДВС

Определение секундного расхода топлива:

$$G_c = \frac{\Delta G}{\tau} \cdot 10^{-3}, \text{ кг/с.}$$

Располагаемое количество энергии, выделяемой при полном сгорании топлива, равно:

$$Q_{расч} = Q_H \cdot G_C, \text{ кДж/с.}$$

Определение количества энергии, превращенной в полезную работу, т.е. эффективной мощности двигателя, определяемой по крутящему моменту:

$$N_e = 0,736 \cdot 10^{-3} \cdot P_T \cdot n, \text{ кВт.}$$

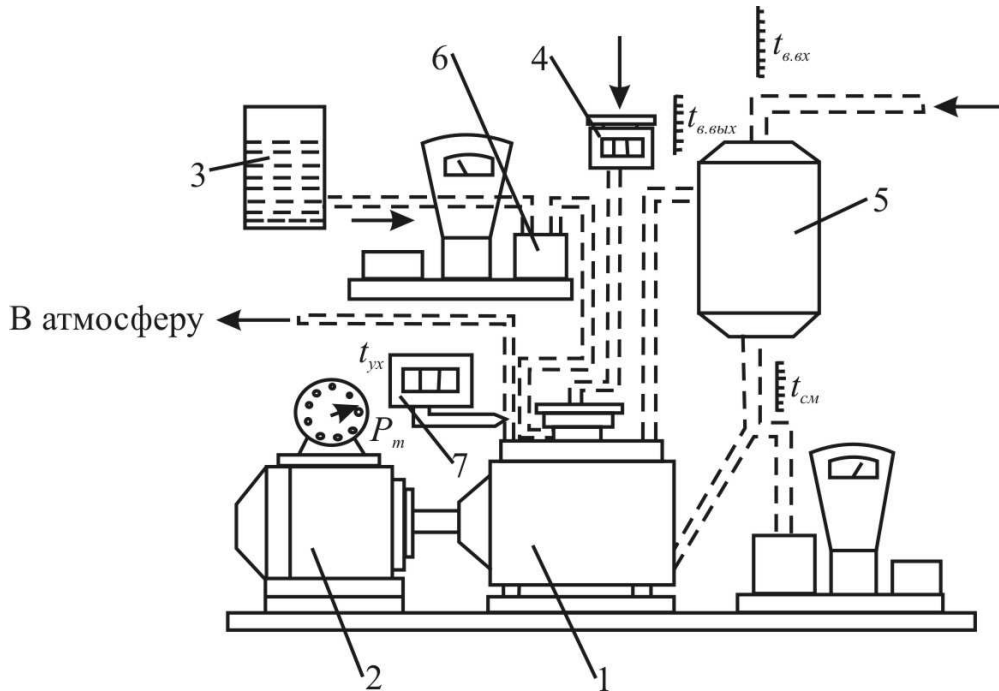


Рисунок 2.1 - Схема установки для снятия энергетического баланса двигателя внутреннего сгорания: 1 – двигатель внутреннего сгорания; 2 – электротормоз; 3 – топливный бак; 4 – расходомер воздуха; 5 – счетчик расхода воды; 6 – промежуточный топливный бак; 7 – термометр для определения температуры продуктов сгорания в выхлопном трубопроводе

Определение коэффициента избытка воздуха:

а) действительное количество воздуха (по нормальному объему), поданное в двигатель на 1 кг топлива:

$$V_o = \frac{V_{сч} \cdot 10^3}{\Delta G} \cdot \frac{P_{окр}}{P_n} \cdot \frac{T_n}{T_{окр}}, \text{ м}^3/\text{кг},$$

б) теоретически необходимое количество воздуха:

$$V_o = 0,0889(C^p + 0,3755S^p) + 0,266H^p - 0,033O^p, \text{ м}^3/\text{кг},$$

в) коэффициент избытка воздуха:

$$\alpha = \frac{V_o}{V_o}.$$

Определение неиспользованной разности энтальпий уходящих газов, или количества тепла, переданного уходящими газами окружающей среде:

а) объем продуктов сгорания топлива:

$$V_{CO_2} = \frac{C^p}{54}, \text{ м}^3/\text{кг}, \quad V_{SO_2} = \frac{0,375S^p}{54},$$

$$V_{H_2O} = 0,111H^p + 0,012W^p + 0,0161V_o \cdot \alpha, \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$V_{N_2} = 0,79V_o + 0,008N^p, \text{ м}^3/\text{кг};$$

б) избыток воздуха в продуктах сгорания:

$$\Delta V_{возд} = (\alpha - 1) \cdot V_o, \text{ м}^3/\text{кг},$$

$$\Delta V_{yx.z} = V_{CO_2} + V_{SO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + \Delta V, \text{ м}^3/\text{кг};$$

в) объемные доли компонентов продуктов сгорания:

$$r_{CO_2} = \frac{V_{CO_2}}{V_{yx.z}}, \quad r_{SO_2} = \frac{V_{SO_2}}{V_{yx.z}} \text{ и т.д.};$$

г) объемная теплоемкость продуктов сгорания:

$$c_{p\ yx.z} = \sum_{i=1}^{i=n} c_{pi} \cdot r_i, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{ К}),$$

д) неиспользуемая разность энтальпий уходящих газов:

$$Q_{yx.z} = G_c (V_{yx.z} \cdot c_{p\ yx.z} \cdot t_{yx.z} - V_d \cdot c_{pv} \cdot t_o), \text{ кДж}/\text{с}.$$

Количество тепла, переданного охлаждающей воде, определяется из теплового баланса по формуле:

$$Q_{охл.в} = M_{вс} \cdot 4,19(t_{в.вых} - t_{в.вх}), \text{ кДж}/\text{с}.$$

Неиспользованное количество энергии вследствие химической неполноты сгорания:

$$Q_{хн} = 14600(1 - \alpha) \cdot 4,19 \cdot G_c, \text{ кВт}.$$

8. Количество тепла, переданного в окружающую среду, и неучтенные потери:

$$Q_{ост} = Q_{расп} - N_e - Q_{yx.z} - Q_{охл.в} - Q_{хн}.$$

Таблица 2.1 - Опытные данные

Измеряемая величина	Обозначение	Единицы измерения	Полученные данные
Расход топлива	ΔG	г	
Время опыта	τ	с	
Частота вращения	n	мин ⁻¹	
Усилие на тормозе	P_m	кг	
Температура окружающей среды	t_o	°С	
Давление окружающей среды	B	МПа	
Температура уходящих газов	$t_{ух.г}$	°С	
Температура воды на входе	$t_{в.вх}$	°С	
Температура воды на выходе	$t_{в.вых}$	°С	
Расход охлаждающей воды на опыт	$M_в$	кг	
Расход воздуха на опыт	$V_{сч}$	м ³	

Таблица 2.2 - Элементы теплового баланса

Элементы баланса	Формула для вычисления	Величина	
		кВт	%
Располагаемое количество энергии			
Полезная работа			
Тепло, переданное охлаждающей воде			
Тепло, отданное окружающей среде уходящими газами			
Остаточный член баланса			

Выводы по работе: _____

Лабораторная работа №3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВОДЫ

Цель работы

Задачи работы

Определение коэффициента теплопроводности воды

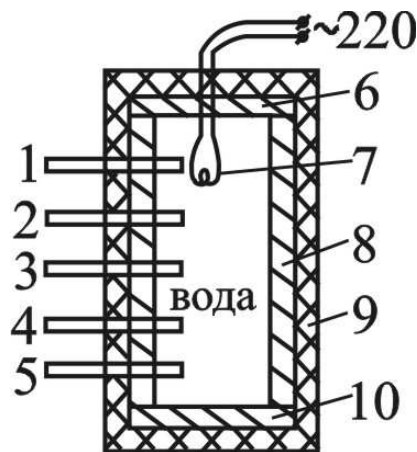


Рисунок 3.1 - Схема установки для определения коэффициента теплопроводности воды: 1, 2, 3, 4, 5 - термометры; 6 - фланец верхний; 7 - нагревательный элемент; 8 - труба; 9 - теплоизоляция; 10 - фланец нижний

Величина коэффициента теплопроводности подсчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{U \cdot I \cdot S}{(t_1 - t_2) \cdot F \cdot 3600}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Величина термического сопротивления:

$$\zeta = \frac{S}{\lambda}.$$

Температуропроводность воды определяется по выражению:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho_{cp} \cdot c_{cp}}$$

Таблица 3.1 - Данные замеров и результаты расчетов

№ п/п	τ, мин	Показания термометров, °С					λ, Вт/(м·К)	S/λ	α	ρ ₁ , кг/м ³	C ₁ , кДж/(кг·К)	ρ ₂ , кг/м ³	C ₂ , кДж/(кг·К)	T _{cp} , К
		t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅								

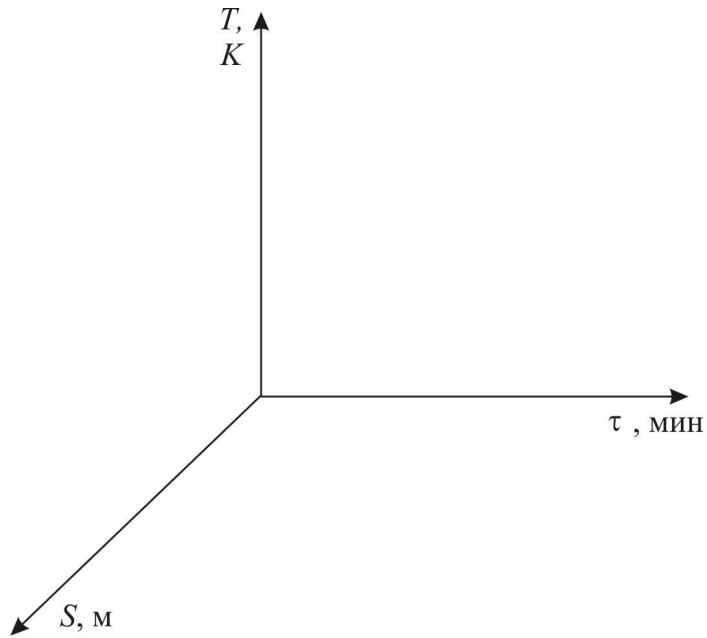


Рисунок 3.1 – Зависимость $T = f(\tau, S_i)$

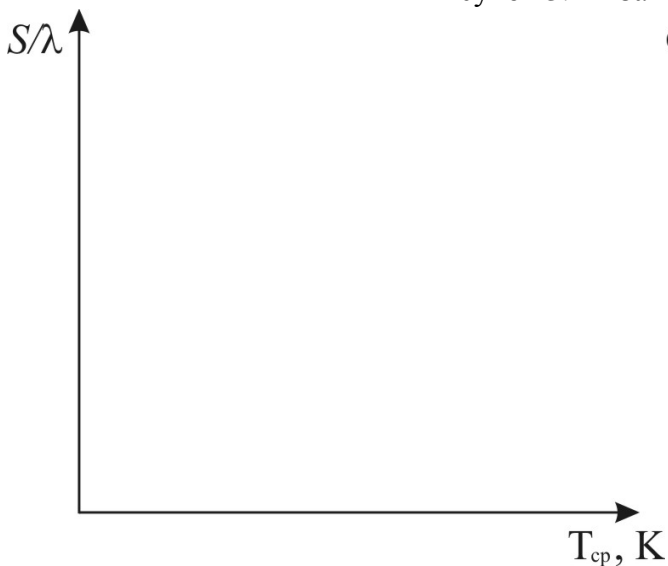


Рисунок 3.2 – Зависимость $S/\lambda = f(T_{cp})$

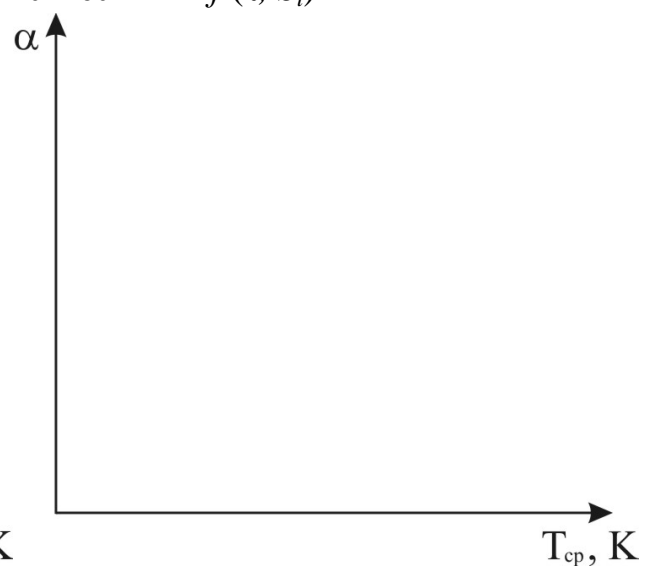


Рисунок 3.2 – Зависимость $\alpha = f(T_{cp})$

Выводы по работе: _____

Лабораторная работа № 4

ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЕ

Цель работы

Задачи работы

Описание установки

Установка (рисунок 4.1) состоит из вертикальной цилиндрической стальной трубы, обмурованной теплоизоляцией. Длина трубы 1500 мм, внутренний диаметр – 94 мм. В нижнем фланце установлены нагревательные элементы. По боковой образующей трубы через 250 мм установлены пять термометров.

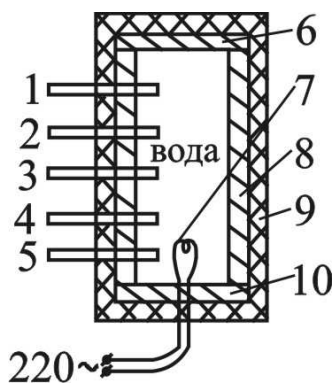


Рисунок 4.1 - Схема установки для исследования конвективного теплообмена в воде: 1, 2, 3, 4, 5 - термометры; 6 - фланец верхний; 7 - нагревательный элемент; 8 - труба; 9 - теплоизоляция; 10 - фланец нижний

Исследование конвективного теплообмена в вертикальной цилиндрической трубе

Циркуляционное давление подсчитывается по следующей формуле:

$$P = 9,81(\rho_s - \rho_i)(1,5 - S_i), \text{ кПа.}$$

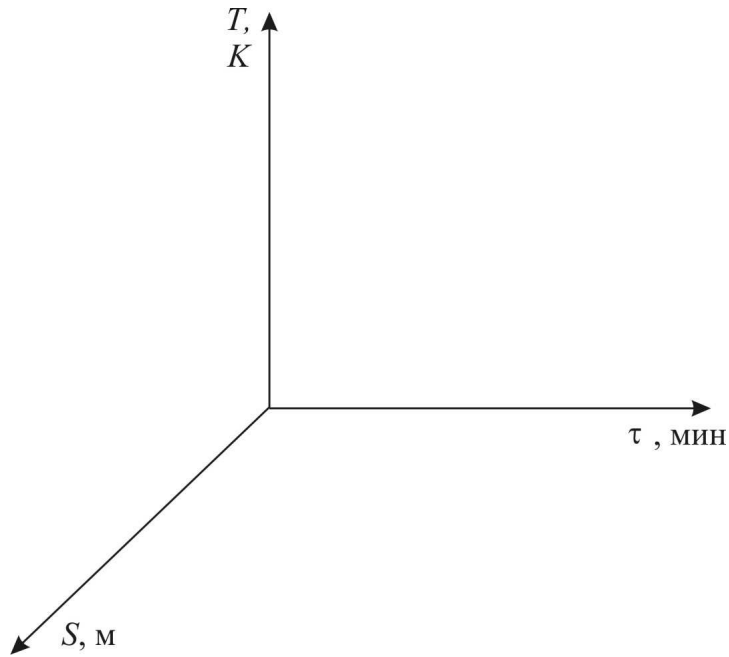


Рисунок 4.1 – Зависимость $T = f(\tau, S_i)$

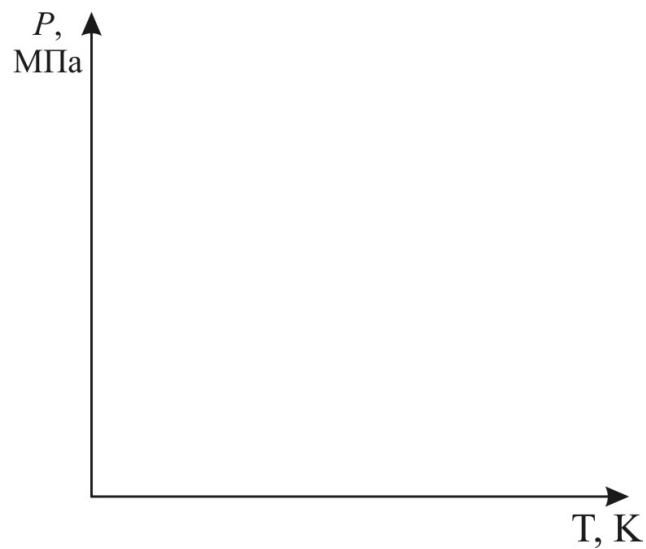


Рисунок 4.2 – Зависимость $T = f(\tau, S_i)$

Таблица 4.1 - Данные опытов и результаты расчетов

№ п/п	Показания термометров, °С					Плотность воды, кг/м ³					Циркуляционное давление, кПа				
	<i>t</i> ₁	<i>t</i> ₂	<i>t</i> ₃	<i>t</i> ₄	<i>t</i> ₅	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	<i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂	<i>P</i> ₃	<i>P</i> ₄	<i>P</i> ₅

Выводы по работе: _____

Лабораторная работа № 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ В ПОДОГРЕВАЕМОМ ЦИЛИНДРЕ ПРИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА

Цель работы

Задачи работы

Определение коэффициента теплоотдачи в подогреваемом цилиндре при естественной конвекции воздуха

Числа P_r и l в диапазоне температур от 20 до 100°С изменяются существенно, поэтому для точности расчета используют эмпирические соотношения:

$$P_r = -0,0002 t + 0,7068; \quad l = 8 t 10^{-5} + 0,0244, \text{ Вт /м} \cdot \text{К},$$

$$n = (0,1015 t + 12,94) 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

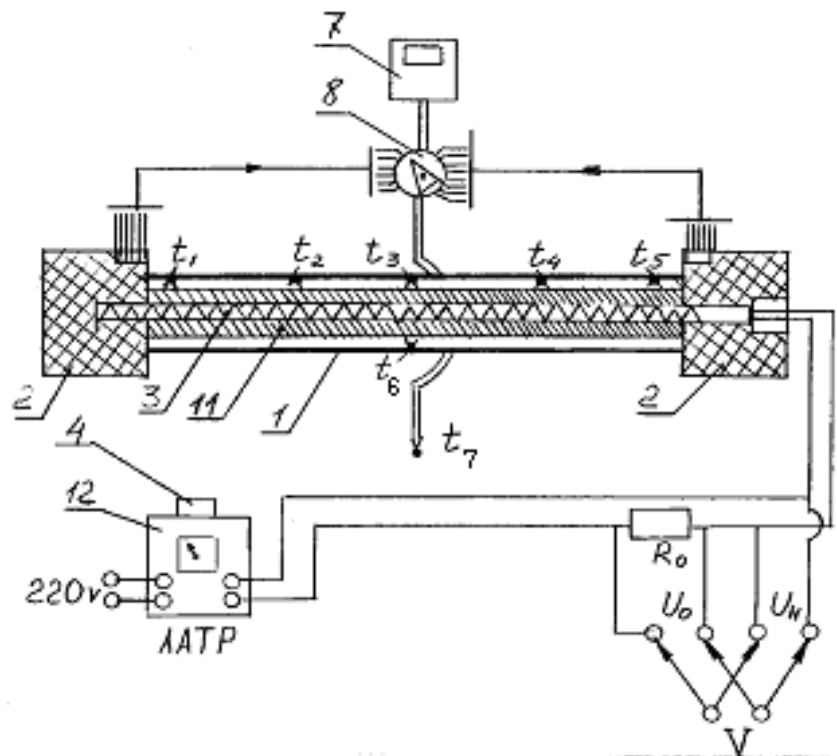
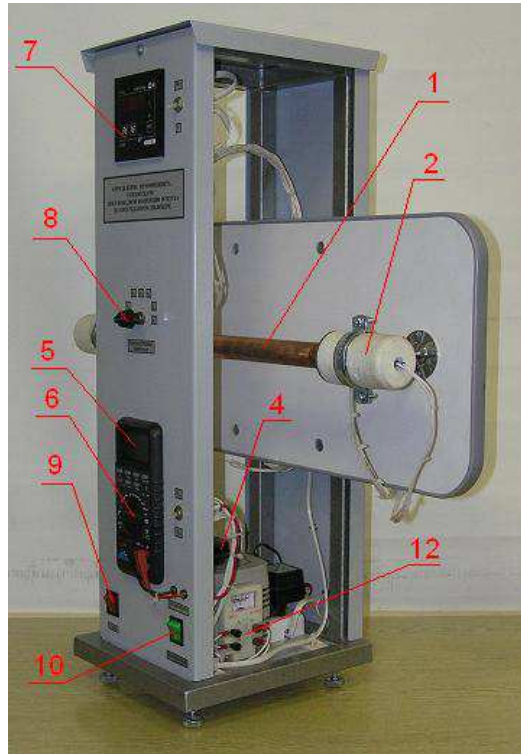


Рисунок 5.1 – Лабораторная установка: 1 – медная тонкостенная труба; 2 - заглушка из теплоизолирующего материала; 3 – нагреватель; 4 – регулятор ЛАТРа; 5 – мультиметр; 6 - переключатель мультиметра; 7 – измеритель температуры; 8 – переключатель измерения температуры; 9 – тумблер; 10 – тумблер включения нагревателя; 11 – термостат; 12 - источник переменного напряжения (ЛАТР)

Критерии подобия определяются выражениями

$$N_u = 0,5 (G_r P_r)^{0,25},$$

$$G_r = (gd^3 \Delta T) / (n^2 T),$$

Коэффициент теплоотдачи, характеризующий условия теплообмена между жидкостью и поверхностью твердого тела

$$a = q / \Delta T.$$

Плотность теплового потока через наружную стенку трубы

$$q = Q/F = (U_n I_n) / (dlp),$$

где

$$I_n = U_o / R_o.$$

Температура поверхности трубы t_{cm} определяется по формуле:

$$t_{cm} = (t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5) / 5$$

Таблица 5.1 - Таблица результатов измерений и расчетов

№ п/п	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	$U_H, В$	$U_o, мВ$	$I_H = U_o / R_o$	$P, Вт$

Выводы по работе: _____

Лабораторная работа № 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ЖИДКОСТНОГО РАДИАТОРА И РАСЧЕТ ВЕНТИЛЯТОРА ДВС

Цель работы

Задачи работы

Определение коэффициента теплоотдачи жидкостного радиатора и расчет вентилятора ДВС

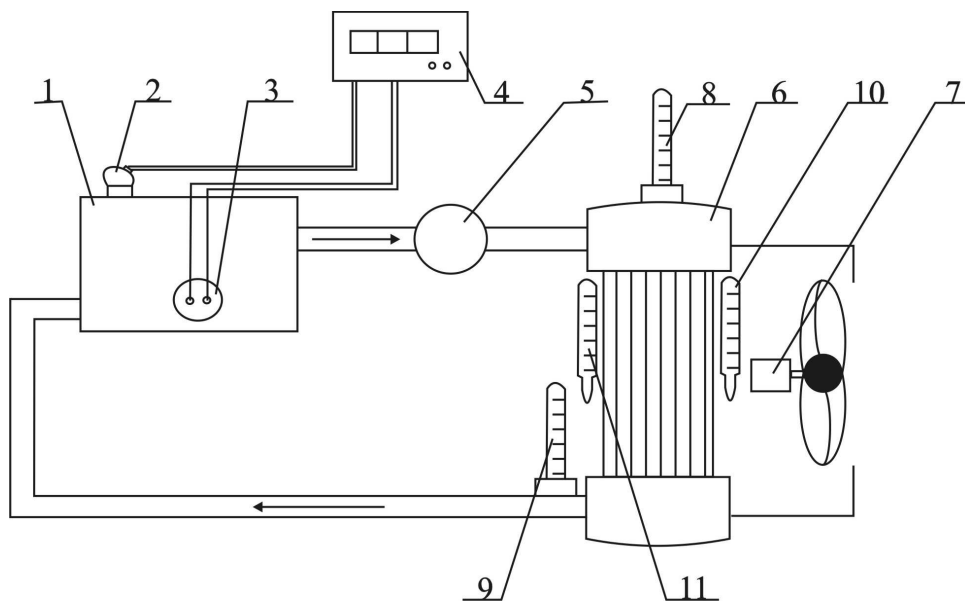


Рисунок 6.1 - Схема установки для определения теплоотдачи и теплопередачи жидкостного радиатора: 1 – бак с водой; 2 – термопара; 3 – нагревательный элемент; 4, 12 – прибор ОВЕН; 5 – водяной насос; 6 – радиатор; 7 – вентилятор; 8, 9 – термопары для определения температуры воды, соответственно, на входе и выходе из радиатора; 10, 11 - термопары для определения температуры воздуха до и после радиатора

Коэффициент теплопередачи радиатора определяется:

$$K = \frac{Q_{ж}}{F \cdot (T_{ср.жс.} - T_{ср.возд.})}$$

Полное количество тепла определяется по расходу электроэнергии на нагреватель:

$$Q_{пол} = I \cdot U \cdot \tau, \text{ Вт.}$$

Определяем среднюю температуру воды в радиаторе и среднюю температуру воздуха, проходящего через радиатор:

$$T_{ср.ж.} = \frac{T_{ж.вх.} - T_{ж.вых.}}{2},$$

$$T_{ср.возд.} = \frac{T_{возд.вх.} - T_{возд.вых.}}{2}.$$

Определяем плотность воздуха при средней его температуре в радиаторе:

$$\rho_{возд} = P_o \cdot 10^6 / R_v \cdot T_{ср.возд.}$$

Производительность вентилятора определится

$$G_{возд} = G_{возд} / \rho_{возд}.$$

$$G_{возд} = Q_{пол} / c_{возд} \cdot \Delta T_{возд}.$$

Определяем фронтную поверхность радиатора:

$$F_{\phi} = G_{возд} / w_{возд}.$$

Определяем диаметр вентилятора:

$$D_{вент} = 2 \left(\frac{F_{\phi}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Определяем окружную скорость вентилятора:

$$u = \psi_{л} \left(\frac{\Delta p_{тр}}{\rho_{возд}} \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Тогда частота вращения вентилятора равна.

$$n_{вент} = 60 u / \pi D_{вент}.$$

Мощность, затрачиваемая на привод осевого вентилятора определяется

$$N_{\text{возд}} = G_{\text{возд}} \Delta p_{\text{тр}} / 1000 \eta_{\text{в}}$$

Таблица 6.1 - Опытные данные и результаты расчета

Показатели	Положение заслонки		
	закры- тое	полуоткры- тое	откры- тое
Температура $t_{\text{ж.вх.}}$, °С			
Температура $t_{\text{ж.вых.}}$, °С			
Температура $t_{\text{возд.вх.}}$, °С			
Температура $t_{\text{возд.вых.}}$, °С			
Полное количество тепла, Вт			
Коэффициент теплопередачи, Вт/м ² К			
Мощность, затраченная на привод вентилятора, кВт			

Выводы по работе: _____

Лабораторная работа №7

ИССЛЕДОВАНИЕ РОТАЦИОННЫХ КОМПРЕССОРОВ

Цель работы

Задачи работы

Исследование ротационных компрессоров

Теоретическая производительность пластинчатого компрессора

$$V_0 = \pi \cdot D \cdot n \cdot 2 \cdot m \cdot l, \text{ м}^3/\text{мин.}$$

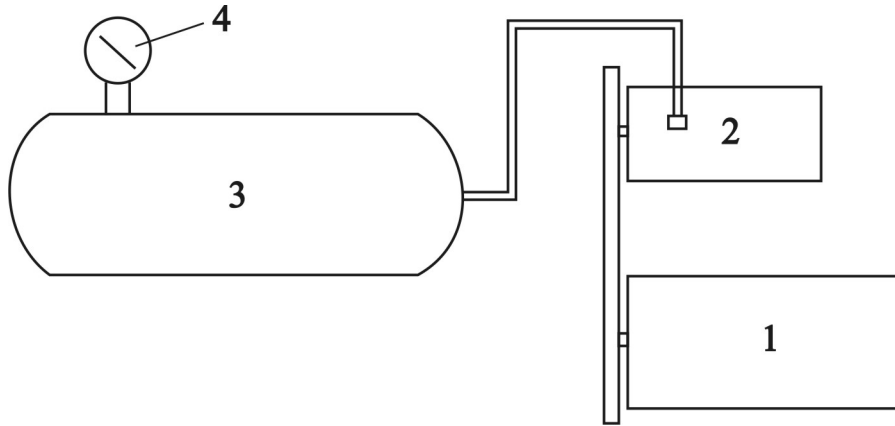


Рисунок 7.1 - Схема установки для исследования компрессора:
1 – электродвигатель; 2 – компрессор; 3 – ресивер; 4 - манометр

Действительная производительность равна:

$$V_{\text{рот}} = \left(\lambda_{\text{рот}} \cdot \frac{\pi D - z s}{\pi D} \right) \cdot V_0 = \lambda_{\text{рот}} \cdot (\pi D - z s) \cdot 2 m n l, \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Коэффициент подачи ротационного компрессора

$$\lambda_{\text{рот}} = 1 - \frac{a \cdot p_{\text{вс}}}{p_{\text{наг}}},$$

Давление нагнетания определяется:

$$p_{\text{наг}} = p_{\text{бар}} + p_{\text{м}}$$

Эффективная мощность равна:

$$N_{\text{е.рот}} = \frac{R \cdot T_0}{1000 \cdot \eta_{\text{из}}} \cdot \ln \frac{p_{\text{наг}}}{p_{\text{вс}}} \cdot V_{\text{рот}} \cdot \rho_{\text{вс}}, \text{ кВт},$$

Работа, затраченная компрессором, определяется по формуле:

$$L = N_{\text{е.рот}} \cdot \tau, \text{ кДж},$$

Объем, нагнетаемый компрессором, определяется из выражения:

$$\frac{P_{наг}}{P_{вс}} = \left(\frac{V_p}{V_{наг}} \right)^{\kappa},$$

Таблица 7.1 - Опытные данные

Давление $P_{наг}$, атм	τ , с
1,2	
1,4	
1,6	
1,8	
2,0	
2,2	
2,4	

Таблица 7.2 - Обработанные результаты

$P_{наг}$, атм	$V_{рот}$, м ³ /с	$V_{наг}$, м ³	$N_{в.рот}$, кВт	L , кДж
1,2				
1,4				
1,6				
1,8				
2,0				
2,2				
2,4				

Выводы по работе: _____

Оглавление

Лабораторная работа № 1. Обработка индикаторных диаграмм	3
Лабораторная работа № 2. Снятие энергетического баланса ДВС	6
Лабораторная работа № 3. Определение коэффициента теплопроводности воды	10
Лабораторная работа № 4. Исследование конвективного теплообмена в вертикальной цилиндрической трубе	12
Лабораторная работа № 5. Определение коэффициента теплоотдачи в подогреваемом цилиндре при естественной конвекции воздуха	14
Лабораторная работа № 6. Определение коэффициента теплоотдачи жидкостного радиатора и расчет вентилятора ДВС	17
Лабораторная работа № 7. Исследование ротационных компрессоров	19

Учебное издание

Вылегжанин Павел Николаевич,
Лопарев Аркадий Афанасьевич,
Лопатин Олег Петрович

ТЕПЛОТЕХНИКА

Журнал для выполнения
лабораторных работ по дисциплине «Теплотехника»
для студентов инженерного факультета,
обучающихся по направлениям подготовки:
23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических
машин и комплексов,
23.03.01 Технология транспортных процессов

Редактор И.В. Окишева