

*МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ*

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Цифровая энергетика»

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООТДАЧИ
ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ВОЗДУХА
ОКОЛО ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Тепломассообмен»

Кафедра: «Цифровая энергетика»
Дисциплины: «Тепломассообмен»
Составил доцент, канд. техн. наук В. А. Савельев

Печатается в соответствии с планом издания, утвержденным методическим советом университета 17.12.2025

Утверждены на заседании кафедры 06.02.2026

Лабораторная работа

Тема: Исследование теплоотдачи при свободной конвекции воздуха около горизонтальной трубы

ЦЕЛЬ РАБОТЫ: изучение закономерностей и определение коэффициента теплоотдачи при свободной конвекции воздуха около горизонтальной трубы в неограниченном пространстве.

Конвективный теплообмен

Самопроизвольный необратимый процесс передачи теплоты в пространстве с неоднородным распределением температуры называется теплообменом, или теплопередачей.

Тепловые процессы между телами в различных агрегатных состояниях содержат и различные формы обмена тепловой энергией. В частности, процесс теплопередачи между жидкостью или газом и поверхностью твердого тела при их соприкосновении называется конвективным теплообменом. Этот процесс осуществляется одновременно действием теплопроводности и конвекцией.

Теплопроводность – процесс передачи теплоты при непосредственном соприкосновении различных тел или отдельных частиц тела, имеющих разные температуры.

Конвекция – процесс передачи теплоты при перемещении объемов жидкости или газа в пространстве из области с одной температурой в область с другой. При этом перенос энергии неразрывно связан с перемещением самой среды.

Различают две разновидности конвективной передачи теплоты – естественную (или свободную) и вынужденную. Если движение рабочего тела вызвано искусственно (вентилятором, компрессором, мешалкой и т. д.), то такой конвективный теплообмен называется вынужденным. Если движение возникает под влиянием разности плотностей отдельных частей рабочего тела, то такой конвективный теплообмен называется свободным, или естественным.

В данной работе рассматривается естественный конвективный теплообмен вокруг нагретой горизонтальной трубы.

Теплоотдача при естественной конвекции

Вокруг нагретой горизонтальной трубы, находящейся в воздухе, имеющем иную температуру, устанавливается неравномерное температурное поле и возникает свободное движение воздуха. При этом нагретые слои воздуха становятся легче, поднимаются вверх, а на их место поступают более плотные холодные слои. Характер такого движения воздуха можно иллюстрировать рисунком 1.



Рисунок 1 – Характер свободного движения воздуха около нагретой горизонтальной трубы

Таким образом, тепло, воспринятое частицами воздуха от трубы, переносится ими в окружающую среду. Количество перенесенного тепла будет возрастать с увеличением скорости движения воздуха, но так как скорость движения воздуха увеличивается с возрастанием разности плотностей, которая, в свою очередь, определяется температурой тела и окружающей его среды (температурным режимом), то, следовательно, теплоотдача от нагретой трубы к воздуху будет определяться температурным напором. Кроме того, интенсивность теплоотдачи зависит от физических свойств окружающей среды, от формы, положения тела и ряда других факторов.

Процесс конвективного теплообмена между поверхностью тела и средой описывается законом Ньютона – Рихмана, который устанавливает, что количество теплоты Q , передаваемое конвективным теплообменом в единицу времени, прямо пропорционально площади поверхности твердого тела и разности температур его поверхности и окружающей среды $t_0 - t_\infty$:

$$Q = \alpha(t_0 - t_\infty). \quad (1)$$

Или, используя понятие плотности теплового потока ($q = Q / F$),

$$q = \alpha(t_0 - t_\infty), \quad (2)$$

где α – коэффициент теплоотдачи [$\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$], характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой, $(t_0 - t_\infty)$ – температурный напор.

Коэффициент теплоотдачи α является функцией ряда параметров.

$$\alpha = f(\Phi; l; w; \theta; \lambda; a; c_p; \rho; v; \beta),$$

Φ – форма тела (плоская, цилиндрическая),

L – размеры и положение его поверхности (горизонтальная, вертикальная);

w – скорость среды (жидкость, газ); режим движения среды (ламинарный, турбулентный):

$\theta = (t_0 - t_\infty)$ – температурный напор;

λ – коэффициент теплопроводности;

a – коэффициент температуропроводности;

ν – коэффициент кинематической вязкости;

c_p – изобарная удельная теплоемкость среды;

ρ – плотность;

$\beta = 1/T$ – температурный коэффициент объемного расширения;

T – абсолютная температура.

Определение этой функции весьма затруднительно и невозможно получить общую формулу такой зависимости. Поэтому прибегают к опытному определению коэффициента теплоотдачи в каждом конкретном случае.

Экспериментально коэффициент теплоотдачи α можно получить из закона Ньютона – Рихмана прямыми или косвенными измерениями теплового потока Q , разности температур поверхности теплоотдачи F и окружающей среды [температурного напора $(t_0 - t_\infty)$]:

$$\alpha = Q / (t_0 - t_\infty) F.$$

Экспериментальный модуль представляет собой цилиндр, нагреваемый изнутри с определением температуры поверхности цилиндра. Необходимо учитывать, что в стационарном режиме (при постоянстве температуры поверхности цилиндра во времени) теплота расходуется на конвекцию и излучение:

$$Q = Q_k + Q_l.$$

Второе слагаемое в уравнении учитывает, что все тела являются источниками лучистой энергии. Они передают ее экспериментальному модулю, а он в свою очередь ее отражает. Эта доля вычитается из общего потока тепловой энергии цилиндра, так как она не связана с конвекцией.

$$Q_k = Q - Q_l.$$

Величина Q_l определяется по уравнению Стефана – Больцмана, Вт,

$$Q_l = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_\infty}{100} \right)^4 \right],$$

где ε – степень черноты поверхности тела;

C_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела:

T_0 – температура источника теплоты:

T_{∞} – температура окружающей среды.

Объектом изучения в данной работе является свободная конвекция, которая вызвана только различием в плотностях нагретых и охлажденных частей жидкости или газа.

Описание экспериментальной установки

Эксперимент проводится на лабораторном стенде «Теплотехника и термодинамика», НТЦ-22.05.1 с использованием модуля НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра» (рисунок 2).

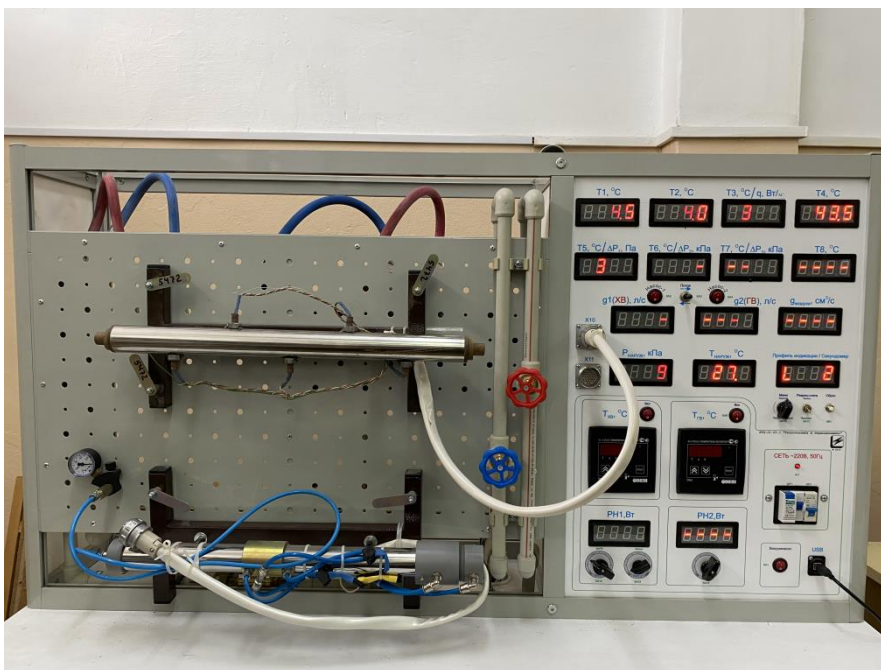


Рисунок 2 – Лабораторный стенд НТЦ-22.05.1 «Теплотехника и термодинамика» с модулем НТЦ-22.05.1/3

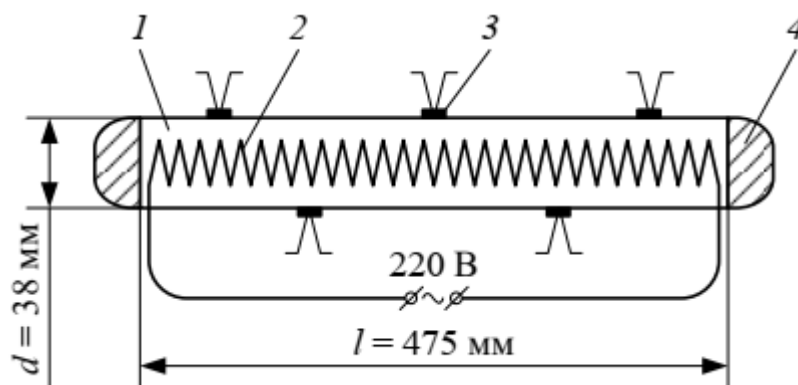
На рисунке 3 показан модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра».



Рисунок 3 – Модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра»

Модуль (рисунок 4) представляет собой отрезок стальной трубы длиной $l = 475$ мм с наружным диаметром $d = 34$ мм. Снаружи поверхность трубы покрыта тонким слоем никеля. Ее площадь рассчитывается по формуле $F = \pi dl$.

$F = 0,051 \text{ м}^2$. Внутри трубы 1 помещен электрический нагреватель 2, питаемый переменным током, мощность которого регулируется. Торцевые сечения трубы заделаны текстолитовыми дисками 4, предотвращающими осевые утечки тепла. На поверхности опытной трубы установлено пять термодатчиков 3, три равномерно размещены по длине вдоль образующей трубы сверху, а два расположены на противоположной стороне снизу. Это позволяет измерить среднюю температуру внешней поверхности трубы.



1 – никелированная труба, 2 – электронагреватель, 3 – термодатчик, 4 – термозаглушки

Рисунок 4 – Схема модуля НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтальной трубы»

Сигналы датчиков регистрируются приборами лабораторного стенда, которые показывают локальные температуры поверхности цилиндра, температуру окружающего воздуха и тепловой поток (подведенную электрическую мощность).

Конфигурация индикаторов, используемых в данной работе, изображена на рисунке 5.

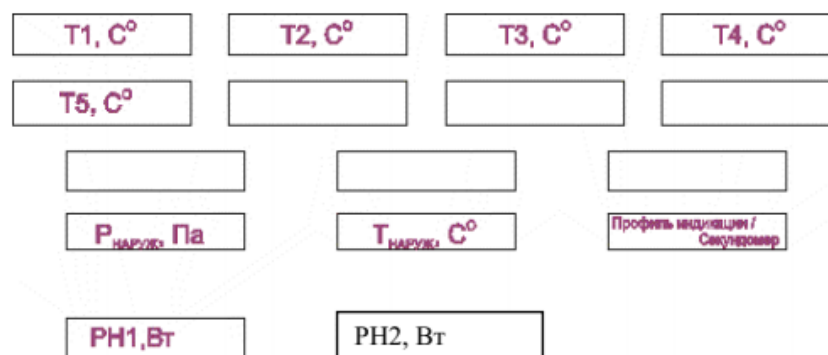


Рисунок 5 – Конфигурация индикаторов приборной панели

Сразу после включения нагревателя происходят процессы нагрева цилиндра и теплообмена с окружающей средой. Спустя некоторый промежуток времени после нагрева цилиндра температура его поверхности стабилизируется – наступит стационарный режим. Все подводимое к цилиндру тепло будет передаваться воздуху конвекцией и излучением. Именно этими двумя процессами при заданной мощности нагрева и будет определяться темпера-

тура поверхности цилиндра. Знание значений температур среды и поверхности цилиндра, а также мощности нагревателя позволит провести анализ процесса теплообмена.

Порядок проведения исследования

1 Установить Модуль НТЦ-22.05.1/3 «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра» (рисунок 2) на перфорированную панель и закрепить поворотом крепежных рукояток во встречном направлении на четверть оборота. Подключить кабель модуля к разъему X10 на панели стенда.

2 Убедиться в том, что переключатели установлены в положения: SA1 – «выкл», SA2 (Насос-1) – «выкл», SA3 – «нижнее», SA4 (Насос-2) – «выкл», SA5 – «выкл», SA6 – «выкл», SA14 – min, SA15 – min, SA16 – min.

3 Включить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда. Установить профиль индикации «L 2». Для этого необходимо нажать и удерживать в нажатом состоянии «затчик» SA10. Через несколько секунд появится мигающая надпись «L 1». Вращением по часовой стрелке последовательно увеличивается номер профиля индикации от «L 1» и далее по кругу, а вращением против часовой стрелки уменьшается до «L 1». Конфигурация отображаемых на индикаторах параметров данной работы изображена на рисунке 5.

4 Включить компьютер. Подключиться через usb порт к стенду. На рабочем столе найти папку «Свободная конвекция» и открыть ее. На дисплее появится методичка проведения данной работы. На компьютере запустить программу управления стендом PDind. Выбрать лабораторную работу «Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра». На экране отобразятся графики измеряемых параметров в реальном времени.

5 По указанию преподавателя регуляторами SA14 (PH1) и SA15 (PH2) установить требуемую мощность электронагревателя Q ; (регулятор SA15 (PH2) обеспечивает более плавную настройку электронагревателя).

6 Наблюдать за значениями температур t_1, t_2, t_3, t_4 и $t_5, ^\circ\text{C}$ (показания датчиков T1-T5) и по достижению установившегося режима (режим теплопередачи считается установившимся, если значение температуры за 2 минуты не превышает $0,1 ^\circ\text{C}$). Занести в таблицу 1 значения локальных температур нагрева и температуру воздуха в градусах $^\circ\text{C}$, а также теплового потока Q (сумма показаний регулятора PH1 и регулятора PH2).

7 По завершении опыта регуляторами мощности SA14 (PH1) и SA15 (PH2) установить увеличенное значение Q и повторить опыт по указанию преподавателя.

8 После выполнения работы регуляторами SA14 (PH1) и SA15 (PH2) установить мощность электронагревателя на нулевое значение.

9 Выключить автоматические выключатели QF1 и QF2 на панели стенда.

10 Результаты измерений занести в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты измерений

Номер опыта	Тепловой поток Q Вт	Температура воздуха $t_{в}, ^\circ\text{C}$	Температура стенки трубы в локальных точках $t, ^\circ\text{C}$					Средняя температура стенки трубы $t_{ср}, ^\circ\text{C}$
			t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	
1								
2								
3								

Обработка результатов эксперимента

Определяем среднюю температуру образующей стенки трубы и заносим в таблицу 1

$$t_0 = \frac{(t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5)}{5},$$

Тепловой поток Q_k , передаваемый окружающему воздуху конвекцией определяется разностью между количеством теплоты нагретой трубы Q и тепловым излучением Q_l

$$Q_k = Q - Q_l$$

Q_l определяется уравнением Стефана – Больцмана по формуле:

$$Q_l = \varepsilon C_0 \left[\left(\frac{T_0}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_\infty}{100} \right)^4 \right],$$

где ε – степень черноты поверхности экспериментальной трубы.

Для никелированной трубы коэффициент черноты равен $\varepsilon=0.11$.

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

T_0 – средняя температура стенки трубы в К,

T_∞ – температура воздуха в К.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k определяем по формуле:

$$\alpha = \frac{Q}{(t_0 - t_\infty)F}.$$

Результаты расчетов заносим в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчетов

Номер Режима	Тепловой поток Q , Вт	Температура стенки трубы $t_c, ^\circ\text{C}$	Температура воздуха $t_v, ^\circ\text{C}$	Тепловой поток радиации Q_l , Вт	Тепловой поток конвекции Q_k , Вт	Температурный напор $\Delta t, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k
1							
2							
3							

По результатам расчета строим график $\alpha_k = f(\Delta t)$.

Расчетное определение коэффициента теплоотдачи α

Найденная в опытах зависимость коэффициента теплоотдачи α_k от температурного напора $\Delta t = t_c - t_g$ справедлива только для данных условий эксперимента и может быть использована только при соблюдении условий теории подобия.

Обобщенные зависимости, справедливые для всех подобных процессов теплоотдачи, представляют в форме критериальных уравнений, то есть в выражении функциональной зависимости друг от друга нескольких критериев

$$Nu = f(Re, Gr, Pr),$$

где $Nu = \alpha l / \lambda$ – критерий Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи), характеризует теплообмен между поверхностью стенки и жидкостью или (газом);

$Re = wl / \nu$ – критерий Рейнольдса, характеризует соотношение сил инерции и вязкости и определяет характер течения жидкости (газа);

$Gr = (\beta g l^3 \Delta t) / \nu$ – критерий Грасгофа, характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости (газе) вследствие разности плотностей;

$Pr = \nu / a = (\mu c_p) / \lambda$ – критерий Прандтля, характеризует физические свойства жидкости (газа).

В случае свободной конвекции рекомендуется зависимость:

$$Nu = f(Gr; Pr).$$

Вид этой функциональной зависимости определяют для каждого конкретного случая конвективного теплообмена. В частности, свободная конвекция от горизонтальной трубы диаметром d , находящейся в неограниченном пространстве сухого воздуха, описывается уравнением:

$$Nu = C(Gr \cdot Pr)^n.$$

Коэффициенты C и показатель степени n определяются по таблице 3. Для этого вычисляют критерий Грасгофа Gr по формуле:

$$Gr = (\beta g l^3 \Delta t) / \nu^2,$$

где l – определяющий размер (в данном случае диаметр цилиндра, d);

$\beta = 1/t + 273$ – коэффициент объемного расширения воздуха, K^{-1} ;

g – ускорение свободного падения, m/s^2 ,

$\Delta t = t_0 - t_\infty$ – разность между средней температурой поверхности цилиндра и воздуха,

ν – коэффициент кинематической вязкости, м/с².

Теплофизические свойства сухого воздуха следует выбирать для определяющей температуры, равной среднему арифметическому между средней температурой поверхности цилиндра и температурой воздуха:

$$t_m = (t_0 + t_\infty) / 2.$$

Теплофизические свойства сухого воздуха приведены в таблице 4. Значение критерия Прандтля принимаем постоянным $Pr = 0.71$, как одно из табличных значений теплофизических свойств сухого воздуха, поскольку оно определяется только через теплофизические константы.

Таблица 3 – Показатели C и n в уравнении $Nu = C(Gr \cdot Pr)^n$

Значение комплекса $Gr \cdot Pr$	C	n
$Gr \cdot Pr \leq 5 \cdot 10^2$	1,18	0,125
$5 \cdot 10^2 < Gr \cdot Pr \leq 2 \cdot 10^7$	0,54	0,25
$Gr \cdot Pr > 2 \cdot 10^7$	0,135	0,33

Таблица 4 – Теплофизические свойства сухого воздуха

$t_m, ^\circ\text{C}$	Коэффициент теплопроводности $\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	Кинематический коэффициент вязкости $\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Коэффициент объемного расширения $\beta \cdot 10^3$, К ⁻¹	Pr
10	2,51	14,66	3,53	0,71
20	2,58	15,61	3,42	
30	2,65	16,58	3,30	
40	2,72	17,57	3,29	
50	2,79	18,58	3,17	
60	2,86	19,60	3,06	
70	2,92	20,65	2,94	
80	2,99	21,74	2,83	
90	3,08	22,82	2,72	
100	3,12	23,91	2,67	
120	3,24	26,21	2,58	

Определение коэффициента теплоотдачи α

Значения коэффициента теплоотдачи α рассчитываем для каждого значения мощности нагревателя Q на основе критериальных уравнений.

Для этого в каждом случае определяем число Грасгофа:

$$Gr = (\beta g d^3 \Delta t) / \nu^2,$$

где d – диаметр цилиндра;

Δt – разность между средней температурой поверхности цилиндра и воздуха.

$$\Delta t = t_o - t_\infty.$$

Теплофизические свойства сухого воздуха выбираем из таблицы 4 для определяющей температуры, равной среднему арифметическому между средней температурой поверхности цилиндра и температурой воздуха:

$$t_m = (t_o + t_\infty) / 2.$$

Значение критерия принимаем Прандтля $Pr=0.71$, значения критерия Нуссельта для каждого опыта выбираем из таблицы 3, используя показатели С и п.

Вычисляем коэффициент теплоотдачи α по зависимости:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / d.$$

Значения коэффициентов теплоотдачи, полученные на основе опытных и расчетных данных, заносим в таблицу 5.

Таблица 5 – Сравнительные результаты определения коэффициента теплоотдачи α

Номер режима	Значение комплекса $Gr \cdot Pr$	Критерий Нуссельта Nu	Температурный напор $\Delta t, ^\circ C$	Коэффициент теплоотдачи α_k (расчетный)	Коэффициент теплоотдачи α_k (опытный)
1					
2					
3					

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет по лабораторной работе должен включать:

- 1) цель работы;
- 2) принципиальную схему модуля с ее кратким описанием;
- 3) таблицу записи показаний приборов;
- 4) обработку результатов опытов по трем режимам;
- 5) график зависимости $\alpha = f(\bar{t})$;
- 6) расчетное определение коэффициента α в каждом опыте;
- 7) сравнение результатов расчётных и опытных данных;
- 8) проверку правильности расчетов и определение погрешности;
- 9) выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 1 Поясните отличие процессов теплоотдачи при свободной и вынужденной конвекции.
- 2 Запишите общий вид критериального уравнения конвективного теплообмена.
- 3 Чем отличаются критериальные уравнения при свободной и вынужденной конвекции?
- 4 Какую размерность имеет коэффициент теплоотдачи α при конвективном теплообмене?
- 5 Дайте определение понятия теплового потока.
- 6 Дайте определение термина плотности теплового потока.
- 7 Какие физические величины измеряют при выполнении лабораторной работы?
- 8 Что характеризует критерий Грасгофа Gr ?
- 9 Какую величину характеризует критерий Прандтля Pr ?
- 10 Приведите функциональную схему лабораторной установки.

Библиографический список

- 1 Быстрицкий Г. Ф. Основы энергетики : учебник / Г. Ф. Быстрицкий. – Москва : ИНФРА –М, 2005.
- 2 Ивашко А. Г. Экспериментальное изучение конвективного теплообмена и составление критериального уравнения теплоотдачи горизонтальной трубы : методические указания к лабораторной работе по теплотехнике / А. Г. Ивашко, В. И. Боченин. – Курган, 2006.
- 3 Исследование теплопередачи при естественной конвекции воздуха около горизонтального цилиндра : методические указания к лабораторной работе. – Брест, 2018.
- 4 Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – Москва : Высшая школа, 1980.
- 5 Лабораторный стенд «Теплотехника и термодинамика».

Савельев Виктор Андреевич

**Исследование теплоотдачи при свободной конвекции воздуха
около горизонтальной трубы**

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Тепломассообмен»

Редактор Н. М. Быкова

Подписано в печать 08.10.2026	Формат 60x84 1/16	Бумага 80 г/м ³
Печать цифровая	Усл. печ. л. 0,75	Уч.-изд. л. 0,75
Заказ 53	Тираж 25	

Библиотечно – издательский центр КГУ
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4
Курганский государственный университет.