

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Воронежский государственный технический университет»

Кафедра твердотельной электроники

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ для студентов  
направления подготовки 14.03.01 «Ядерная энергетика и  
теплофизика» профиль «Технологические системы  
жизнеобеспечения атомных электростанций и  
промышленных предприятий» очной формы обучения

Воронеж 2025

УДК 004.94  
ББК 004.94

**Составители:**  
канд. физ.-мат. наук К. Г. Королев

**Компьютерное моделирование технических систем** : методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Технологические системы жизнеобеспечения атомных электростанций и промышленных предприятий» очной формы обучения / ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»; сост.: К.Г. Королев. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2025. – 17 с.

Методические указания подготовлены в электронном виде и содержатся в файле -21. МУ\_140301\_КМТС\_ЛР.pdf.

Ил. 6. Табл. 18. Библиогр.: 5 назв.

*Рекомендовано методическим семинаром кафедры твердотельной электроники и методической комиссией ФРТЭ Воронежского государственного технического университета в качестве методических материалов*

## Лабораторная работа № 1. Расчет двухпоточного теплообменника

**Задание.** Для решения задачи разработать математическую модель в программе SMATH Studio [5] и выполнить расчет по разработанной модели (с учетом встроенных единиц измерения) в соответствии со своим вариантом. Построить графические зависимости всех расчетных параметров от наружного  $d_n$  и внутреннего  $d_v$  диаметров трубки. Оформить отчет по лабораторной работе.

Таблица 1 – Варианты заданий для лабораторной работы № 1

№ варианта	$p_1$ , МПа	$G_1$ , кг/с	$p_2$ , МПа	$G_2$ , кг/с
1	14,9	0,07	0,3	0,11
2	14,8	0,08	0,4	0,12
3	14,7	0,09	0,5	0,13
4	14,6	0,10	0,6	0,14
5	14,5	0,11	0,7	0,15
6	14,4	0,12	0,8	0,16
7	14,3	0,13	0,9	0,17
8	14,2	0,14	1,0	0,18
9	14,1	0,15	1,1	0,19
10	14,0	0,16	1,2	0,20
11	13,9	0,17	1,3	0,21
12	13,8	0,18	1,4	0,22
13	13,7	0,19	1,5	0,23
14	13,6	0,20	1,6	0,24
15	13,5	0,21	1,7	0,25
16	13,4	0,22	1,8	0,26
17	13,3	0,23	1,9	0,27
18	13,2	0,24	2,0	0,28
19	13,1	0,25	2,1	0,29
20	13,0	0,26	2,2	0,30

**Задача.** Определить значения температур потоков на выходе из теплообменника при заданных значениях температур потоков на входе, известной геометрии теплообменника, массовых расходов и теплофизических свойств потоков. Потерями давления и теплопритоком из окружающей среды пренебречь.

**Исходные данные.** Теплообменник двухпоточный, витой, кожухотрубный, противоточный: прямой поток — воздух высокого давления  $p_1 = 15,0$  МПа, массовый расход  $G_1 = 0,06$  кг/с, температура на входе  $T_1 = 300$  К; обратный поток — кислород низкого давления  $p_2 = 0,2$  МПа, массовый расход  $G_2 = 0,1$  кг/с, температура на входе  $T_2 = 100$  К.

Геометрические характеристики теплообменника: наружный диаметр трубки  $d_n = 0,01$  м, внутренний  $d_v = 0,007$  м; наружный диаметр сердечника  $D_c = 0,154$  м; средняя длина трубки  $l = 36$  м, число трубок  $n = 10$ ; число слоев навивки  $Z = 4$ , толщина прокладок: основной  $\delta_0 = 0,001$  м, крайней  $\delta_1 = 0,0005$  м. Воздух течет в трубном пространстве, кислород — в межтрубном.

**Решение.** Определяем значения необходимых для вычисления величин с помощью программы REFPROP [1].

Найдем коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубки. Проходное сечение трубного пространства

$$f_B = 0,25\pi n d_B^2 = 0,25 \cdot 3,14 \cdot 10 \cdot 0,007^2 = 3,847 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

Массовая скорость воздуха

$$w_B = G_1/f_B = 0,06/3,847 \cdot 10^{-4} = 156 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

Средняя температура

$$T_{\text{ср}} = 0,5(T_1 + T_2) = 0,5(300 + 100) = 200 \text{ К}.$$

При средней температуре  $T_{\text{ср}} = 200 \text{ К}$  и давлении  $p_1 = 15,0 \text{ Мпа}$  воздух имеет следующие теплофизические свойства:

- динамическая вязкость  $\mu_B = 2,285 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,
- теплопроводность  $\lambda_B = 0,0476 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,
- теплоемкость  $c_{p_B} = 1650 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Число Рейнольдса:

$$\text{Re}_B = w_B d_B / \mu_B = 156 \cdot 0,007 / 2,285 \cdot 10^{-5} = 47790.$$

Число Прандтля:

$$\text{Pr}_B = c_{p_B} \mu_B / \lambda_B = 1650 \cdot 2,285 \cdot 10^{-5} / 0,0476 = 0,792.$$

Число Нуссельта для турбулентного режима течения внутри труб:

$$\text{Nu}_B = 0,023 \cdot \text{Re}_B^{0,8} \cdot \text{Pr}_B^{0,4} = 0,023 \cdot 47790^{0,8} \cdot 0,792^{0,4} = 116.$$

Наружный диаметр навивки:

$$D_H = D_C + 2z(d_H + \delta_o) = 0,154 + 2 \cdot 4(0,01 + 0,001) = 0,242 \text{ м}$$

Средний диаметр навивки:

$$D_{\text{ср}} = 0,5(D_C + D_H) = 0,5(0,154 + 0,242) = 0,198 \text{ м}.$$

Поправка на кривизну труб:

$$\varepsilon = 1 + 3,54 \cdot d_B / D_{\text{ср}} = 1 + 3,54 \cdot 0,007 / 0,198 = 1,125.$$

Таким образом, коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубки:

$$\alpha_B = \varepsilon \cdot \text{Nu}_B \cdot \lambda_B / d_B = 1,125 \cdot 116 \cdot 0,0476 / 0,007 = 887 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Найдем коэффициент теплоотдачи от кислорода к стенке трубки.

Проходное сечение межтрубного пространства

$$f_K = \pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot z \cdot \delta_O = 3,14 \cdot 0,198 \cdot 4 \cdot 0,001 = 2,488 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Массовая скорость кислорода

$$w_K = G_2 / f_K = 0,1 / 2,488 \cdot 10^{-3} = 40,2 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с}).$$

При средней температуре  $T_{\text{ср}} = 200 \text{ К}$  и давлении  $p_2 = 0,2 \text{ Мпа}$  кислород имеет следующие теплофизические свойства:

- динамическая вязкость  $\mu_K = 1,48 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ,

- теплопроводность  $\lambda_K = 0,0184 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,

- теплоемкость  $c_{p,K} = 920 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Число Рейнольдса

$$\text{Re}_K = w_K d_H / \mu_K = 40,2 \cdot 0,01 / 1,48 \cdot 10^{-5} = 27160.$$

Число Прандтля

$$\text{Pr}_K = c_{p,K} \mu_K / \lambda_K = 920 \cdot 1,48 \cdot 10^{-5} / 0,0184 = 0,74.$$

Число Нуссельта для межтрубного пространства

$$\text{Nu}_K = 0,2 C_z \text{Re}_B^{0,66} \cdot \text{Pr}^{0,35} = 0,2 \cdot 0,95 \cdot 27160^{0,66} \cdot 0,74^{0,35} = 144.$$

Коэффициент теплоотдачи от кислорода к стенке трубки

$$\alpha_K = \text{Nu}_K \lambda_K / d_H = 144 \cdot 0,0184 / 0,01 = 265 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Интегральный коэффициент теплопередачи между кислородом и воздухом

$$k = \pi n d_B \alpha_B d_H \alpha_K l / (d_B \alpha_B + d_H \alpha_K) =$$

$$= 3,14 \cdot 10 \cdot 0,007 \cdot 887 \cdot 0,01 \cdot 265 \cdot 36 / (0,007 \cdot 887 + 0,01 \cdot 265) =$$

$$= 2100 \text{ Вт/К.}$$

Число единиц переноса теплоты:

- по воздуху  $N_1 = \frac{k}{c_{p_B} \cdot G_B} = 2100 / (1650 \cdot 0,06 = 21,21);$

- по кислороду  $N_1 = \frac{k}{c_{p_K} \cdot G_K} = 2100 / (920 \cdot 0,1 = 22,83).$

Температуры потоков воздуха  $T_B$  и кислорода  $T_K$  на выходе из теплообменника определяют из [3]:

$$T_B = A \exp(N_2 - N_1) + B = -45,63 \exp(22,83 - 21,22) + 345,6 =$$

$$= 117,3 \text{ К,}$$

$$T_K = AN_2/N_1 + B = -45,63 \cdot 22,83/21,22 + 345,6 = 296,5 \text{ К,}$$

где  $A = (T_1 - T_2) / [1 - \exp(N_2 - N_1)(N_2/N_1)] =$

$$= (300 - 100) / [1 - \exp(22,83 - 21,21)(22,83/21,21)] = -45,64 \text{ К,}$$

$$B = [T_2 - T_1 \exp(N_2 - N_1) \cdot (N_2/N_1)] / [1 - \exp(N_2 - N_1)(N_2/N_1)] =$$

$$= [100 - 300 \exp(22,83 - 21,21)(22,83/21,21)] / [1 - \exp(22,83 -$$

$$- 21,21)(22,83/21,21)] = 345,6 \text{ К.}$$

## Лабораторная работа № 2. Расчет скорости испарения воды

**Задание.** Для решения задачи разработать математическую модель в программе SMath Studio [5] и выполнить расчет по разработанной модели (с учетом встроенных единиц измерения) в соответствии со своим вариантом. Среднюю скорость воздуха в расчетах принять в интервале от 0,1 до 10 м/с с шагом 0,1 м/с. Построить графические зависимости всех расчетных параметров от диаметра круга  $d$  и средней скорости воздуха  $v$ . Оформить отчет по лабораторной работе.

**Задача.** Определить массовый расход испаряющейся воды со свободной поверхности. Считать пренебрежительно малым изменение относительной влажности в окружающем воздухе. Изменением температуры в процессе испарения пренебречь.

**Исходные данные.** Испарение происходит при нормальных условиях (температура  $T = 293 \text{ К}$ ; давление  $p = 0,101325 \text{ МПа}$ ). Открытая поверхность воды представляет собой круг диаметром  $d = 0,5 \text{ м}$ . Средняя скорость воздуха равна  $v = 0,1 \text{ м/с}$ . Относительная влажность воздуха  $\varphi = 60 \%$ .

Таблица 2 – Варианты заданий для лабораторной работы № 2

№ варианта	$d, \text{ м}$
1	0,6
2	0,7
3	0,8
4	0,9
5	1,0
6	1,1
7	1,2
8	1,3
9	1,4
10	1,5
11	1,6
12	1,7
13	1,8
14	1,9
15	2,0
16	2,1
17	2,2
18	2,3
19	2,4
20	2,5

**Решение.** Массовая скорость испарения воды со свободной поверхности в воздух определится как

$$m' = \rho_w S k (y_e - y),$$

где  $\rho_w$  – плотность водяных паров в воздухе;

$S = \pi d^2 / 4$  – площадь поверхности воды;

$k$  – коэффициент массопередачи водяных паров в воздух;

$y_e$  и  $y$  – объемные доли водяных паров в воздухе при насыщении и для рассматриваемого случая.

Плотность водяных паров определяется из уравнения состояния идеального газа

$$\rho_w = (Mp) / RT,$$

где  $M = 18$  кг/кмоль – мольная масса воды,

$R = 8314$  Дж/кмоль\*К – универсальная газовая постоянная.

Объемные доли водяных паров в воздухе при насыщении и для рассматриваемого случая связаны соотношением

$$y = \varphi y_e = p_e / p,$$

где  $p_e = 2336$  Па – давление насыщенных водяных паров в воздухе при температуре  $T = 293$  К.

После преобразований получается следующее выражение для массовой скорости испарения воды:

$$m' = \pi d^2 M p_e k (1 - \varphi) / (4RT).$$

Коэффициент массопередачи водяных паров в воздух определится по критериальной зависимости обтекания тела газовым потоком

$$Nu_D = 0,664 Re^{0,5} (Pr_D)^{0,33},$$

где  $Nu_D$  – безразмерное диффузионное число Нуссельта.

$$Nu_D = k d / D_w,$$

где  $D_w = 3,08 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – коэффициент диффузии воды при нормальных условиях;

$Re$  – безразмерное число Рейнольдса для воздушного потока

$$Re = \rho_a v d / \mu_a = 1,205 \cdot 0,1 \cdot 0,5 / 18,144 \cdot 10^{-6} = 3320,$$

где  $\rho_a = 1,205 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,

$\mu_a = 18,144 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$  – плотность и вязкость воздуха при нормальных условиях;

$Pr_D$  – безразмерное диффузионное число Прандтля.

$$Pr_D = \nu_w / D_w = 2,38 \cdot 10^{-5} / 3,08 \cdot 10^{-5} = 0,773,$$

где  $\nu_w = 2,38 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость водяных паров.

В результате

$$Nu_D = 0,664 \cdot 3320^{0,5} \cdot 0,773^{0,33} = 35,14.$$

Коэффициент массопередачи

$$k = Nu_D D_w / d = 35,14 \cdot 3,08 \cdot 10^{-5} / 0,5 = 2,164 \cdot 10^{-3} \text{ м}/\text{с}.$$

Подставляем полученные значения в выражение для массовой скорости испарения воды:

$$m' = \pi \cdot 0,5^2 \cdot 18 \cdot 2336 \cdot 2,164 \cdot 10^{-3} \cdot (1 - 0,6) / (4 \cdot 8314 \cdot 293) =$$

$$= 2,934 \cdot 10^{-6} \text{ кг/с} = 10,562 \cdot 10^{-3} \text{ кг/ч} = 0,253 \text{ кг/сут.}$$

### Лабораторная работа № 3. Расчет параметров барботажного устройства

**Задание.** Для решения задачи разработать математическую модель в программе SMath Studio [5] и выполнить расчет по разработанной модели (с учетом встроенных единиц измерения) в соответствии со своим вариантом. В расчете построить графические зависимости всех параметров от  $G_1$  и  $r_0$ . Расчеты провести для значений  $r_0 = 0,25$  мм; 0,5 мм; 1,5 мм; 2,5 мм; 3 мм. Оформить отчет по лабораторной работе.

Таблица 2 – Варианты заданий для лабораторной работы № 2

№ п/п	$G_1$ , кг/с
1	1,0
2	2,0
3	3,0
4	4,0
5	5,0
6	6,0
7	7,0
8	8,0
9	9,0
10	10,0
11	11,0
12	12,0
13	13,0
14	14,0
15	15,0
16	16,0
17	17,0
18	18,0
19	19,0
20	20,0

**Задача.** Определить массовый расход кислорода и оптимальную высоту столба воды в барботажном устройстве, используемом для насыщения воды кислородом. Барботажное устройство представляет собой сосуд, снизу которого подается вода и пузырьки кислорода, сверху отводится вода, насыщенная кислородом, и часть нерастворившегося в воде газообразного кислорода. Влиянием гидростатического давления и теплотой растворения кислорода в воде пренебречь.

**Исходные данные.** Массовый расход воды  $G_1 = 1,0$  кг/с, начальный радиус подаваемых пузырьков кислорода  $r_0 = 1,5$  мм. Растворение происходит при нормальных условиях (температура  $T = 293$  К; давление  $p = 0,101325$  МПа).

**Решение.** Максимальная мольная доля растворенного газа в жидкости (предельная растворимость) определяется по закону Генри:

$$C_{\max} = p/H = 0,101325 \text{ МПа}/4295 \text{ МПа} = 2,36 \cdot 10^{-5},$$

где  $p$  – парциальное давление кислорода в пузырьке (пренебрегая процессом обратной диффузии паров воды в пузырек кислорода и гидростатическим давлением, эту величину можно принять равной заданному нормальному давлению);

$H$  – постоянная Генри для кислорода при его растворении в воде, зависящая от температуры и в слабой степени от давления. Для нормальных условий ее величина составляет 4295 МПа.

Количество кислорода, необходимого для полного насыщения воды, определится из уравнения материального баланса смеси воды с растворенным кислородом:

$$G_2 = [C_{\max}/(1 - C_{\max})](m_2/m_1)G_1 = \\ = [2,36 \cdot 10^{-5}/(1 - 2,36 \cdot 10^{-5})](32/18) = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ кг/с},$$

где  $m_2 = 32 \text{ кг/кмоль}$  – мольная масса кислорода,  
 $m_1 = 18 \text{ кг/кмоль}$  – мольная масса воды.

Оптимальной высотой столба жидкости в барботажном устройстве является расстояние, пройденное пузырьком кислорода до его полного растворения,

$$h = v_{\text{ср}} t_p = 0,296 \cdot 1,37 = 0,406 \text{ м},$$

где  $v_{\text{ср}}$  – средняя скорость всплытия пузырька в процессе его растворения,  
 $t_p$  – время полного растворения пузырька.

Скорость свободного всплытия пузырька  $v_b$  в неподвижной жидкости определяется величинами безразмерных чисел Рейнольдса

$$Re_b = \frac{2\rho_l v_b r_b}{\mu_l}$$

и параметра

$$G_b = \frac{g\mu_l^4}{\rho_l\sigma^3},$$

где  $\rho_l$  – плотность жидкости;  
 $g$  – ускорение свободного падения;  
 $\mu_l$  – вязкость жидкости;  
 $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения жидкости.

Формулы для определения скорости всплытия пузырька имеют вид:  
для  $Re_b < 2$

$$v_b = \frac{2r_b^2(\rho_l - \rho_g)g}{9\mu_l}; \quad (1)$$

для  $2 < Re_b < 4,02 * G_b^{-0,214}$

$$v_b = 0,33g^{0,76} \left( \frac{\rho_l}{\mu_l} \right)^{0,52} r_b^{1,28}; \quad (2)$$

для  $4,02 * G_b^{-0,214} < Re_b < 3,1 * G_b^{-0,25}$

$$v_b = 1,35 \left( \frac{\sigma}{\rho_l r_b} \right)^{0,5}; \quad (3)$$

для  $Re_b > 3,1 * G_b^{-0,25}$

$$v_b = 1,18 \left( \frac{g\sigma}{\rho_l} \right)^{0,25}. \quad (4)$$

Для расчетов средней скорости движения пузырька можно принять значение, вычисленное для среднеарифметического значения радиуса

$$r_{\text{ср}} = 0,5r_0 = 0,5 \cdot 0,0015 = 0,00075 \text{ м.}$$

Расчет скорости всплытия пузырька определяется итерационным методом по формулам (1) – (4) для значений коэффициента поверхностного натяжения воды  $\sigma = 0,07196$  Н/м, плотности  $\rho_l = 977$  кг/м<sup>3</sup> и коэффициента динамической вязкости воды  $\mu_l = 0,894 * 10^{-3}$  Па \* с, взятых для нормальных условий. Параметр  $G_b$  имеет значение

$$G_b = [9,81 \cdot (0,894 \cdot 10^{-3})^4] / [977 \cdot (0,07196)^3] = 16,78 \cdot 10^{-12}.$$

Первоначально задаемся значением скорости всплытия  $v_b = 0,1$  м/с, для которой критерий Рейнольдса

$$Re_b = (2 \cdot 977 \cdot 0,1 \cdot 0,0015) / 0,894 \cdot 10^{-3} = 334.$$

Поскольку  $2 < Re_b < 4,02 * G_b^{-0,214} = 813,1$ , то используется формула (2):

$$v_b = 0,33 \cdot (9,81)^{0,76} \cdot (997/0,894 \cdot 10^{-3})^{0,52} \cdot (0,0015)^{1,28} = 0,634 \text{ м/с.}$$

Данная величина больше заданного первоначального значения, поэтому используем среднее значение этих величин скорости:

$$v_b = 0,5 \cdot (0,1 \text{ м/с} + 0,634 \text{ м/с}) = 0,367 \text{ м/с.}$$

Для данной величины скорости критерий Рейнольдса

$$Re_b = (2 \cdot 977 \text{ кг/с} \cdot 0,367 \text{ м/с} \cdot 0,0015 \text{ м/с}) / 0,894 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с} = 1226.$$

Поскольку  $4,02 * G_b^{-0,214} = 813,1 < Re_b < 1532 = 3,1 * G_b^{-0,25}$ , то используется формула (3):

$$v_b = 1,35 \cdot [0,07196 / (997 \cdot 0,00115)]^{0,5} = 0,296 \text{ м/с.}$$

Для данной величины скорости критерий Рейнольдса

$$Re_b = (2 \cdot 997 \text{ кг/с} \cdot 0,296 \text{ м/с} \cdot 0,0015 \text{ м/с}) / 0,894 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с} = 1226.$$

Это значение входит в использованный выше интервал, следовательно, средняя скорость всплытия пузырька составляет  $v_b = 0,296 \text{ м/с}$ .

Время полного растворения пузырька определяется по формуле

$$t_p = \frac{r_0}{k_2 C_{\max} \frac{\rho_1 m_2}{\rho_2 m_1}} = \frac{0,0015}{0,0349 \cdot 2,36 \cdot 10^{-5} \frac{997 \cdot 32}{1,309 \cdot 18}} = 1,372 \text{ с,}$$

где  $k_2$  – коэффициент массопередачи для кислорода в воду при среднем радиусе пузырька  $r_{cp} = 0,00075 \text{ м}$ , коэффициенте диффузии  $D_2 = 2,052 * 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$  и плотности кислорода  $\rho_2 = 1,309 \text{ кг/м}^3$ .

Коэффициент массопередачи  $k$  газа из пузырька в жидкость при свободном всплытии пузыря в неподвижной жидкости определяется из следующих выражений:

при  $r_b < 0,5 \text{ мм}$

$$k = \left( \frac{D}{2r_b} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot v_b^{\frac{1}{3}}, \quad (5)$$

при  $r_b > 2,5$  мм

$$k = 1,13 \cdot \sqrt{\frac{Dv_b}{2r_b}}, \quad (6)$$

где  $D$  – коэффициент диффузии газа в пузырьке;  
 $r_b$  – радиус пузырька,  
 $v_b$  – скорость свободного всплытия пузырька.

Для радиуса пузырька, лежащего в интервале между 0,5 мм и 2,5 мм значение коэффициента массопередачи определяется интерполированием вышеприведенных формул (5) и (6).

Поскольку данное значение радиуса лежит в интервале между 0,5 мм и 2,5 мм, для которого нет соответствующей формулы, то используется среднегеометрическое значение величин, полученных по формулам (5) и (6) соответственно:

$$k_2^1 = \left( \frac{2,052 \cdot 10^{-5}}{2 \cdot 0,0015} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot (0,296)^{\frac{1}{3}} = 0,024 \text{ м/с};$$

$$k_2^2 = 1,13 \cdot \left( \frac{2,053 \cdot 10^{-5} \cdot 0,296}{2 \cdot 0,0015} \right)^{\frac{1}{2}} = 0,0508 \text{ м/с}.$$

В результате коэффициент массопередачи

$$k_2 = \sqrt{k_2^1 \cdot k_2^2} = \sqrt{0,024 \cdot 0,0508} = 0,0349 \text{ м/с}.$$

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лавров Н.А., Савельев Е.Г. Моделирование процессов в низкотемпературных установках: Методические указания к выполнению домашних заданий по курсам «Математическое моделирование криогенных и холодильных установок» и «Математические модели тепловых процессов и оптимизация». – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 12 с.
2. SMath Studio - SMath. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://ru.smath.com/>
3. Mathcad: математическое ПО для инженерных расчетов | Mathcad. – Электрон. дан. – Режим доступа: <https://www.mathcad.com/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А. ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ ОТЧЕТА

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Отчет по лабораторной работе  
по курсу «Компьютерное моделирование технических систем »

Лабораторная работа № 1  
«...»

Выполнил(а) студент(ка) группы ...  
Фамилия И. О.

Проверил канд. физ.-мат. наук  
Королев К. Г.

Воронеж 2025

## СОДЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа № 1. Расчет двухпоточного теплообменника .....	3
Лабораторная работа № 2. Расчет скорости испарения воды .....	6
Лабораторная работа № 3. Расчет параметров барботажного устройства	9
Приложение А. Титульный лист отчета .....	15

# **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

## **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 14.03.01 «Ядерная энергетика и теплофизика» профиль «Технологические системы жизнеобеспечения атомных электростанций и промышленных предприятий» очной формы обучения

**Составитель:**

**Королев** Константин Геннадьевич

Издается в авторской редакции

Компьютерный набор К. Г. Королева

Подписано к изданию 00.00.0000.

Уч.-изд. л. 1,5

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»  
394026 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84