



ВЛИЯНИЕ ОБРАЗУЮЩЕГОСЯ ОСАДКА НА ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

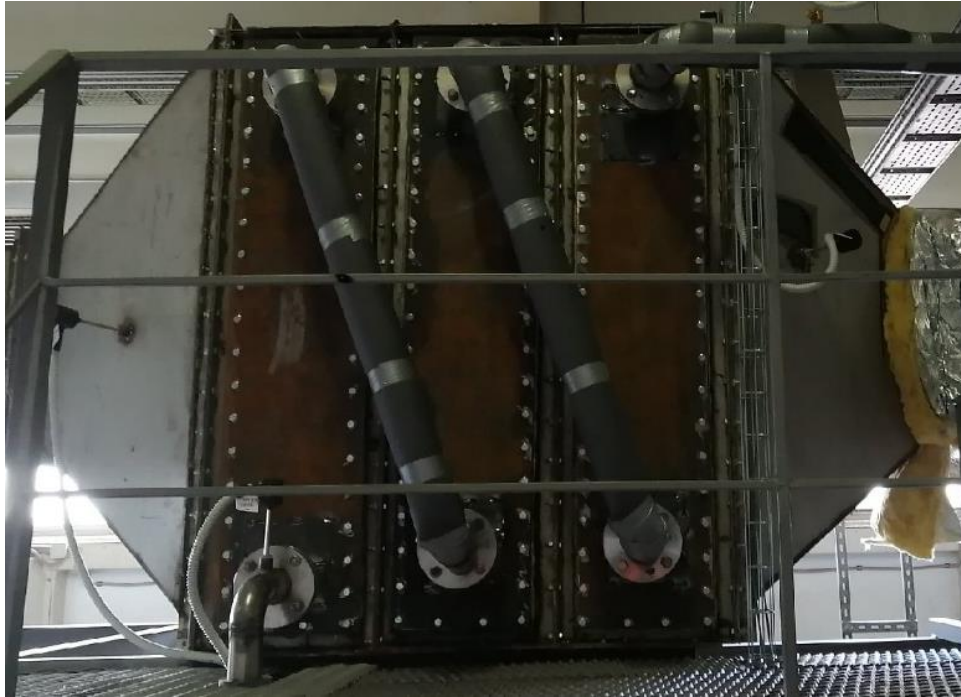
Выполнила: аспирант 3 курса ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Бадретдинова Г.Р.

Научный руководитель: д.т.н., заведующий кафедрой
«АТП» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

Дмитриев А.В.

Постановка проблемы



ЗАКАЗЧИК: ООО «Филиал ВПМ» 420087, РФ, г.Казань, ул.А.Кутуя, д.159 тел./факс: 8(965)6035367 ИНН/КПП 1660243763/166001001 р/сч. 40702810000577545 к/сч. 30101810145250000974 АО «ТИНКОФФ БАНК» БИК 049205603	ИСПОЛНИТЕЛЬ: ФГБОУ ВО «КГЭУ» 420066, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, д.51 Тел./факс: (843) 519-43-72/(843) 527-92-28 УФК по РТ (ФГБОУ ВО «КГЭУ») л/сч 20116Х79020 БИК 049205001 ИНН/КПП 1656019286/165601001 р/сч 40501810292052000002 БИК 049205001 в отделении - НБ Республика Татарстан
---	--

АКТ
СДАЧИ-ПРИЕМКИ ВЫПОЛНЕННЫХ РАБОТ
 ПО ДОГОВОРУ № 10 от 29.10 2020 г.
 на тему «Расчет теплообменного аппарата для нагрева воды за счет тепла парогазовой смеси»
 «29» 10 2020 г.

Общество с ограниченной ответственностью «Филиал ВПМ», именуемое в дальнейшем «Заказчик», в лице директора Котова Вячеслава Владимировича, действующего на основании Устава, с одной стороны, и Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», именуемое в дальнейшем «Исполнитель», в лице проректора по научной работе Ахметовой Ирины Гареевны, действующего на основании доверенности №40-д от 26.08.2020 г., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что работа выполнена в полном объеме и полностью удовлетворяет условиям договора.

Краткое описание выполненных работ: Разработка принципиальной схемы установки теплообменника и определение площади поверхности теплообмена.
 Стоимость выполненных работ составляет 50000 (пятьдесят тысяч) рублей 00 коп. без НДС.

Заказчик: Директор ООО «Филиал ВПМ»  В.В. Котов	Исполнитель: Проректор по научной работе ФГБОУ ВО «КГЭУ»  И.Г. Ахметова
--	--

Рис. 1. Изображение загрязненного промышленного теплообменного аппарата, установленного на промышленном объекте Республики Татарстан, г. Казань

Рис. 2. Акт сдачи-приемки выполненных работ (НИОКР), 2020г.

Построение математической модели формирования осадка на наружной поверхности ребра

Рассмотрено кольцевое круглое ребро с радиусом R_D , м, и толщиной ребра δ_F , м, расположенное на охлаждаемой трубе с радиусом R_0 , м, так что температура в его основании на трубе постоянна $t_0 = \text{const}$. На обеих сторонах ребра происходит конденсация паровоздушной смеси при температуре $t_s = \text{const}$, причём на его поверхности оседают загрязнения.

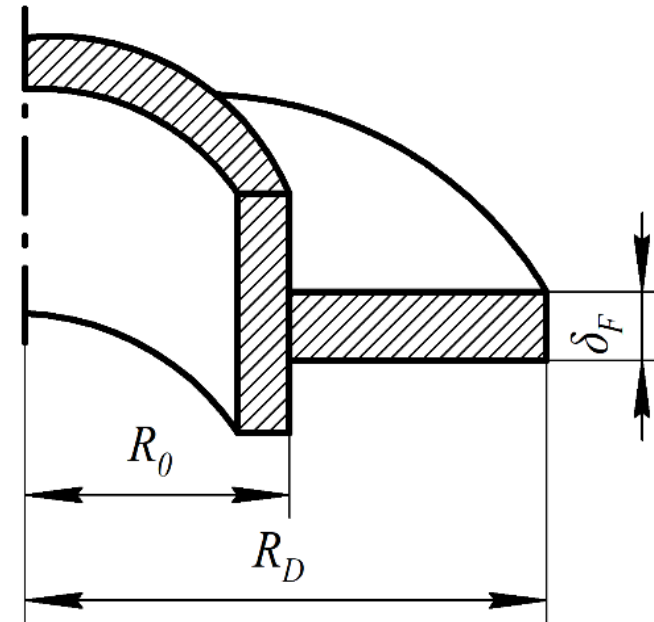


Рис. 3 Схема трубы с наружным поперечным оребрением: *a* – 3D-модель; *б* – расчетная схема

Допущения для математической модели

1. Ребро считается тонким, так что термическим сопротивлением по толщине можно пренебречь, а распределение температуры в самом ребре принимается одномерным в виде $t=t(r, \tau)$.
2. Осадок образует однородный слой, который считается тонким, так что его продольной термической проводимостью в направлении, параллельном поверхности ребра можно пренебречь.
3. Температура осадка на внешней границе равна t_s , а в месте примыкания к ребру равна температуре ребра $t=t(r, \tau)$.
4. Теплоёмкостью материала ребра и осадка можно пренебречь.
5. Толщина $\delta(r, \tau)$ слоя осадка в данном месте r ребра пропорциональна общему количеству образовавшегося в этом месте конденсата.
6. Скорость образования конденсата в месте ребра с координатой r в данный момент времени τ , пропорциональна плотности теплового потока $q(r, \tau)$. Температура пара близка к температуре конденсации t_s , небольшое отличие, может быть учтено поправкой в теплоту конденсации.
7. Искомые функции $t(r, \tau)$ и $\delta(r, \tau)$ непрерывно дифференцируемы по r и τ , причем $t(r, \tau)$ дважды непрерывно дифференцируема по r , кроме момента времени $\tau = 0$.

Некоторые свойства решения полной задачи в безразмерном виде

Исходные параметры задачи:

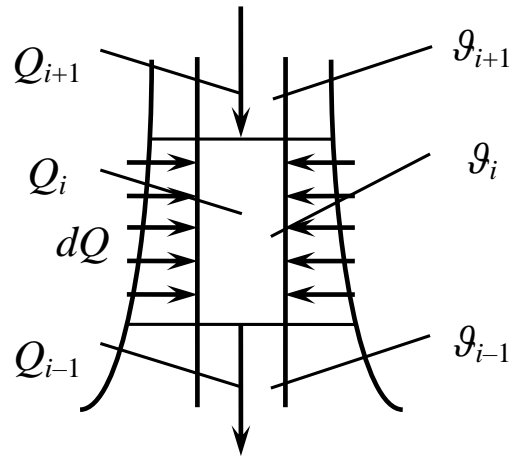


Рис. 4. Расчетная схема тепловых потоков

R_0 - радиус трубы;

R_D - радиус круглого прямого ребра;

$\vartheta_0 = t_s - t_0$ - избыточная температура в основании ребра, где t_s - температура конденсации, $t_0 = \text{const}$ - температура в основании ребра;

$a = 2\lambda_o/(\lambda_p\delta_p)$ - коэффициент уравнений;

$P = k\lambda_o$ - температурный коэффициент роста осадка, т.е. диффузия частиц к поверхности осадка при разнице температур в 1 К, $\text{м}^2/(\text{с}\cdot\text{К})$;

λ_o, λ_p - коэффициент теплопроводности осадка и ребра, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;

k - тепловой коэффициент приращения осадка, т.е. отношение объема, образующегося осадка к теплоте, проходящей через поверхность, на которой он образуется, $\text{м}^3/\text{Дж}$;

δ_p - толщина ребра, м, и вспомогательный параметр;

h_0 - начальное приближение толщины слоя осадка, параметр стремящийся к нулю, м.

Введены безразмерная координата $\chi = \frac{r}{R_0}$, безразмерное время $\Gamma = \frac{\tau P \vartheta_0}{R_0^4 a^2}$ и безразмерные искомые переменные

$$\Theta(\chi, \Gamma) = \frac{\vartheta}{\vartheta_0}, \quad \Gamma(\chi, \Gamma) = \frac{\delta}{aR_0^2}.$$

Математическая модель образования осадка на поверхности оребренной трубы

1. Уравнение для температур

$$\frac{\partial^2 \vartheta(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta(r, \tau)}{\partial r} = \frac{2\lambda_0}{\Lambda} \frac{\vartheta(r, \tau)}{\delta(r, \tau)}$$

Граничные условия для $\vartheta(r, \tau)$

$$\vartheta(r, \tau)|_{r=R_0} = \vartheta_0, \quad \left. \frac{\partial \vartheta}{\partial r} \right|_{r=R_D} = 0$$

2. Уравнение для толщины слоя осадка

$$\frac{\partial \delta(r, \tau)}{\partial \tau} = k\lambda_0 \frac{\vartheta(r, \tau)}{\delta(r, \tau)}$$

Начальные условия для $\delta(r, \tau)$

$$\delta(r, 0) = h_0 = \text{const} > 0, \quad R_0 \leq r \leq R_D$$

Круглое ребро. Безразмерный вид

$$\frac{\partial^2 \Theta(\chi, T)}{\partial \chi^2} + \frac{1}{\chi} \frac{\partial \Theta(\chi, T)}{\partial \chi} = \frac{\Theta(\chi, T)}{\Gamma(\chi, T)}$$

$$\frac{\partial \Gamma(\chi, T)}{\partial T} = \frac{\Theta(\chi, T)}{\Gamma(\chi, T)}$$

Граничные и начальные условия

$$1 \leq \chi \leq R_D/R_0$$

$$\Theta(1, T) = 1, \quad \left. \frac{\partial \Theta(\chi, T)}{\partial \chi} \right|_{\chi=R_D/R_0} = 0$$

$$\Gamma(\chi, 0) = \Gamma_0, \quad 1 \leq \chi \leq R_D/R_0$$

Программа для численного решения уравнений

Круглое

Пуск

R0 1,0

Через 10

В файл

узлов Nx 501

отступ h0 0,0001

высота L 1

m^2d 1

d Tau 1

mTau 10000

Tau = 0

tetN=0

Delta0 = 0

DeltaN = 0

P1_Tau=0,01

Delta0a=

Рис. 5. Программа для расчета круглых ребер

Плоское

Пуск

Через 10

В файл

узлов Nx 501

отступ h0 0,0001

высота L 1

m^2d 1

d Tau 1

mTau 10000

Tau = 0

tetN=0

Delta0 = 0

DeltaN = 0

P1_Tau=0,01

Delta0a=

Рис. 6. Программа для расчета прямых ребер

Результаты исследования

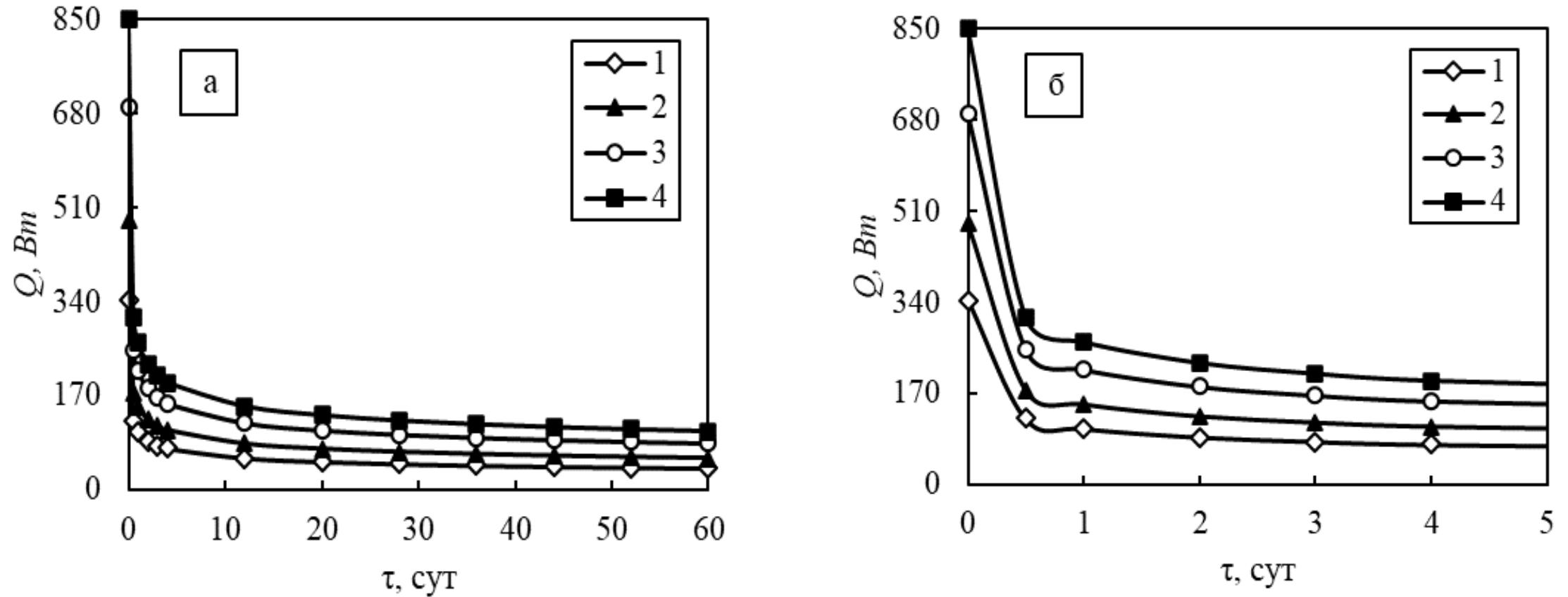


Рис. 7. Временные зависимости теплового потока Q за 60 суток (а) и 5 суток (б) работы теплообменника при различной толщине ребра δ_F , мм: 1 – 0,4; 2 – 1,0; 3 – 2,0; 4 – 3,0

Результаты исследования

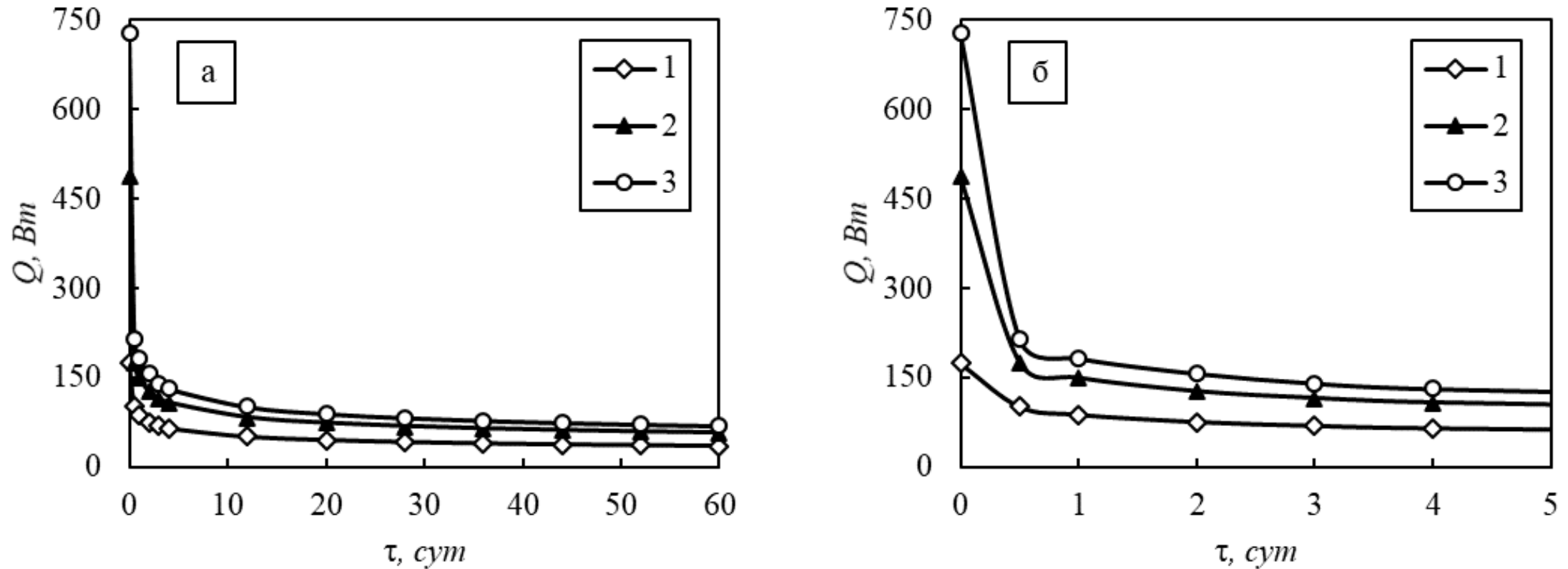


Рис. 8. Временные зависимости теплового потока Q за 60 суток (а) и 5 суток (б) работы теплообменника при различной теплопроводности осадка λ_o , Вт/(м·К): 1 – 0,037; 2 – 0,300; 3 – 0,670

Исследование коэффициента теплоотдачи от паровоздушной смеси к поверхности ребра

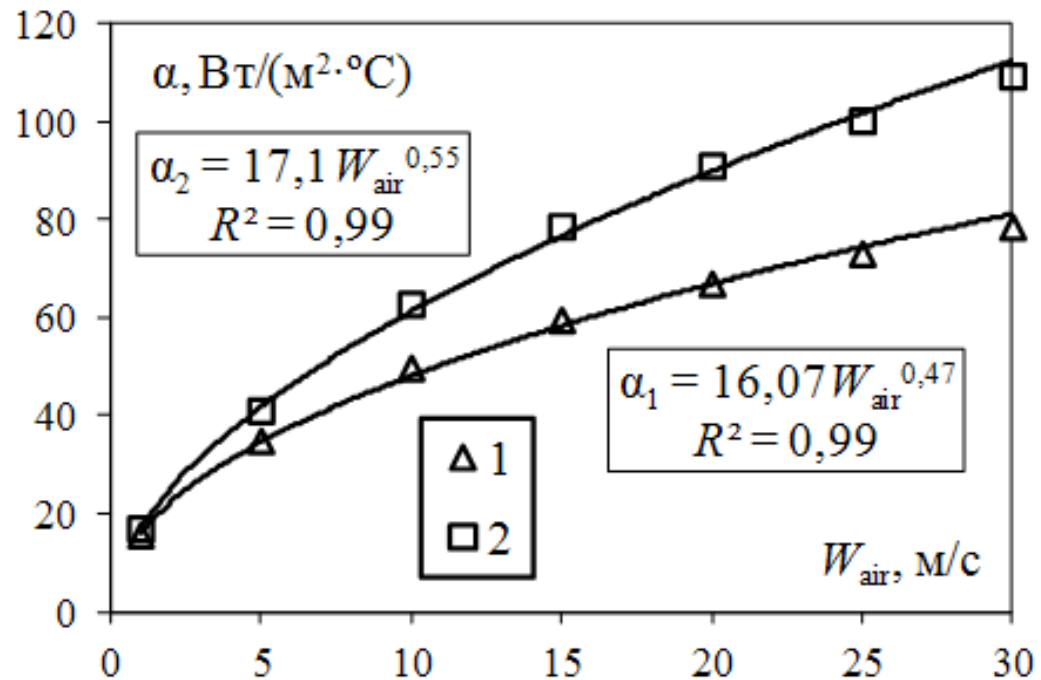


Рис. 9. Зависимость коэффициента теплоотдачи от входной скорости газового потока при различной геометрии ребер: 1 – прямые ребра; 2 – спиральные ребра

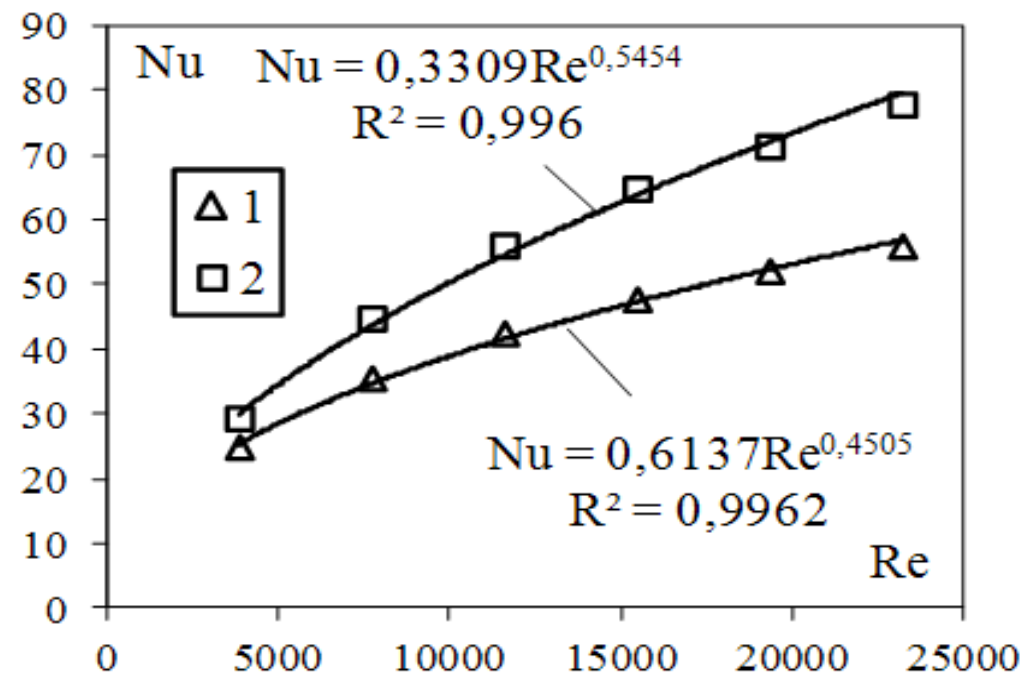


Рис. 10. Зависимость числа Нуссельта от чисел Рейнольдса: 1 – прямые ребра; 2 – спиральные ребра

Численное моделирование конденсации воды из паровоздушной смеси на поверхности с кольцевыми круглыми прямыми ребрами постоянной толщины

11

Поправка ε_q , учитывающую сужение потока в самом узком сечении канала, рассчитывают по формуле

$$\varepsilon_q = \left[1 - \left(\frac{d_H}{H} \right)^2 \right]^{0,8}$$

где d_H – наружный диаметр трубы, м; H – поперечный размер канала, м.

Коэффициент лобового сопротивления частиц определялся по зависимости Шиллера-Ньюмана

$$c_a = 3,14 + \frac{24,27}{Re_a} - 0,716 \lg(Re_a) + 0,047 \lg^2(Re_a)$$

Конденсация пара рассчитывалась по модели Ли

$$\nabla \left(\alpha_v \rho_v \overline{W}_v \right) = m_{lv} - m_{vl}$$

где α_v – объемная доля пара; ρ_v – плотность пара, кг/м³; \overline{W}_v – скорость паровой фазы, м/с.

Скорость массопереноса за счет испарения ($T_l > T_{sat}$):

$$m_{lv} = coeff \alpha_l \rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}}$$

где $coeff$ – константа конденсации, определяемая экспериментальным путем; T_l – температура жидкости, К; T_{sat} – температура сатурации, К.

Скорость массопереноса за счет конденсации ($T_l < T_{sat}$):

$$m_{vl} = coeff \alpha_v \rho_v \frac{T_{sat} - T_v}{T_{sat}}$$

где T_v – температура пара, К.

В установившемся потоке без учета силы тяжести скорость проскальзывания рассчитывалась по формуле Маннинен

$$u_{cp} = -\frac{\tau_p}{c_a} \frac{\rho_a - \rho}{\rho_a} (u \cdot \nabla) u$$

где ρ_a – плотность капель, кг/м³; ρ – плотность сплошной среды, кг/м³.

Время релаксации определялось по формуле: $\tau_p = \frac{\rho_a a^2}{18\mu}$

где μ – вязкость сплошной среды, Па·с.

Результаты исследования

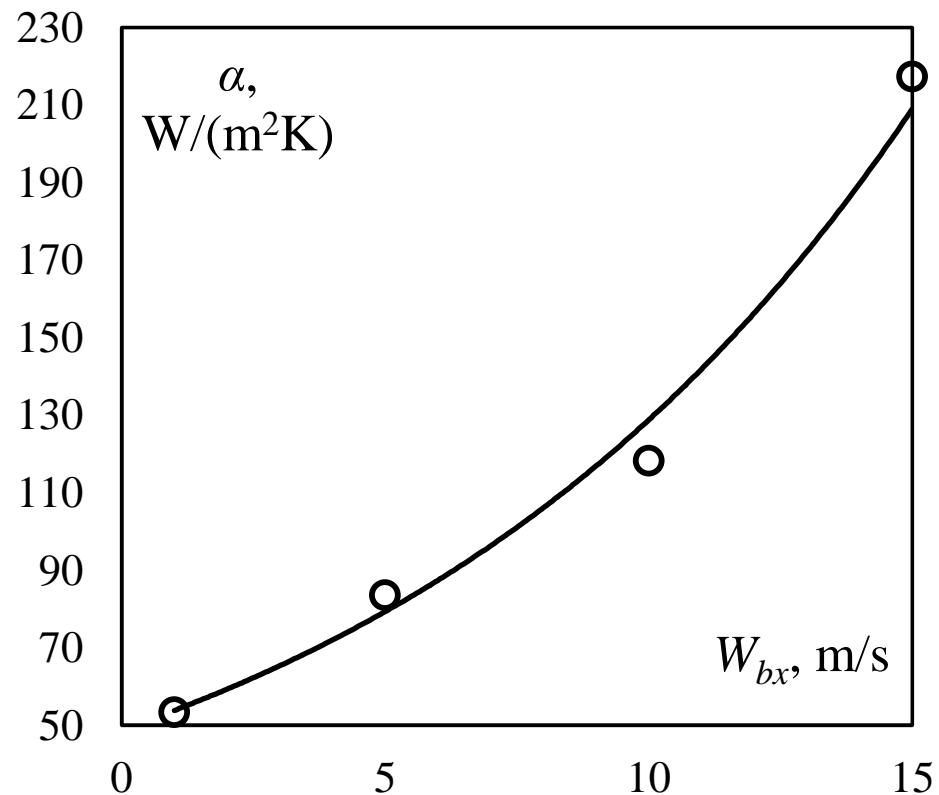


Рис. 11. Зависимость коэффициента теплоотдачи от поверхности гладкой трубы при ее обтекании в ограниченном потоке от скорости воздуха на входе.

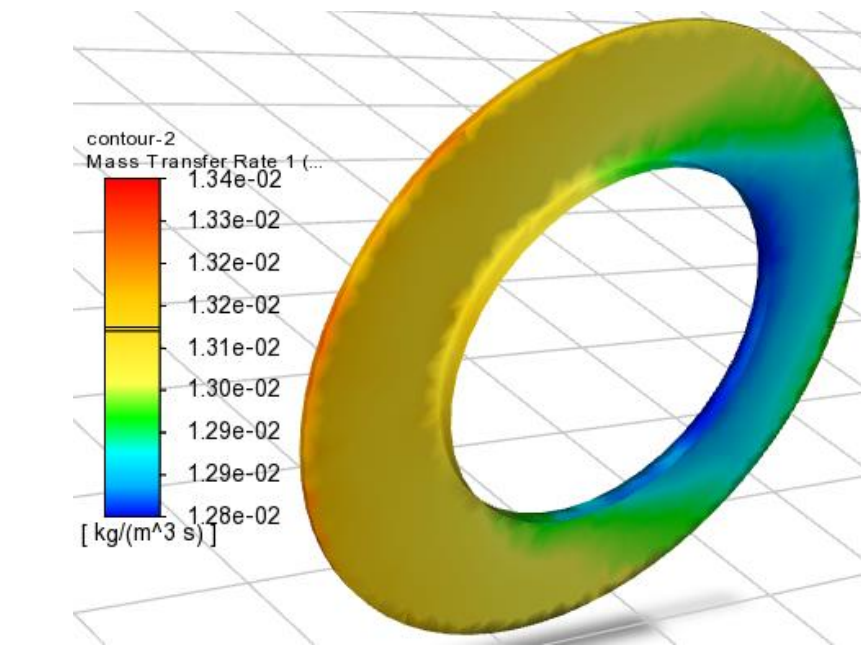
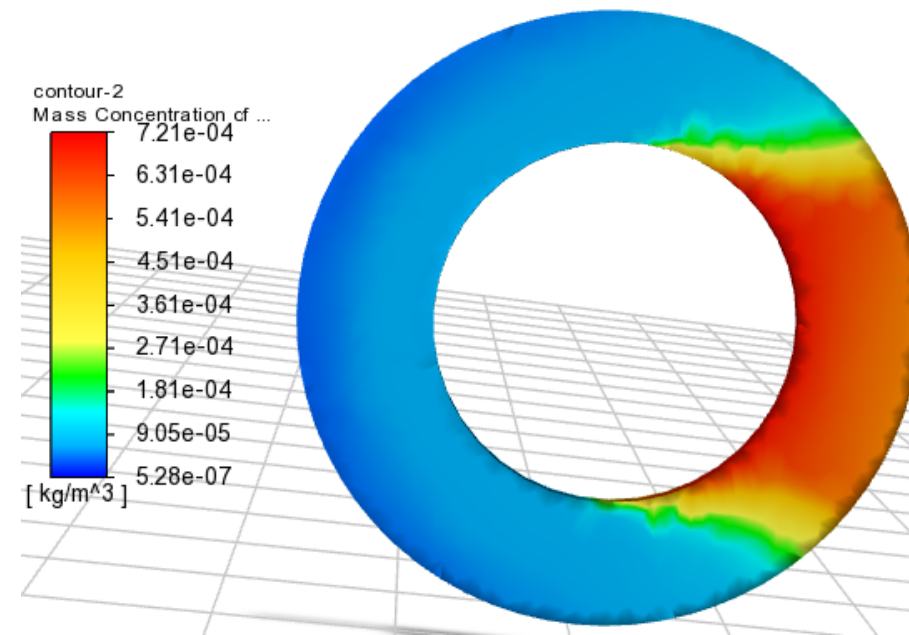
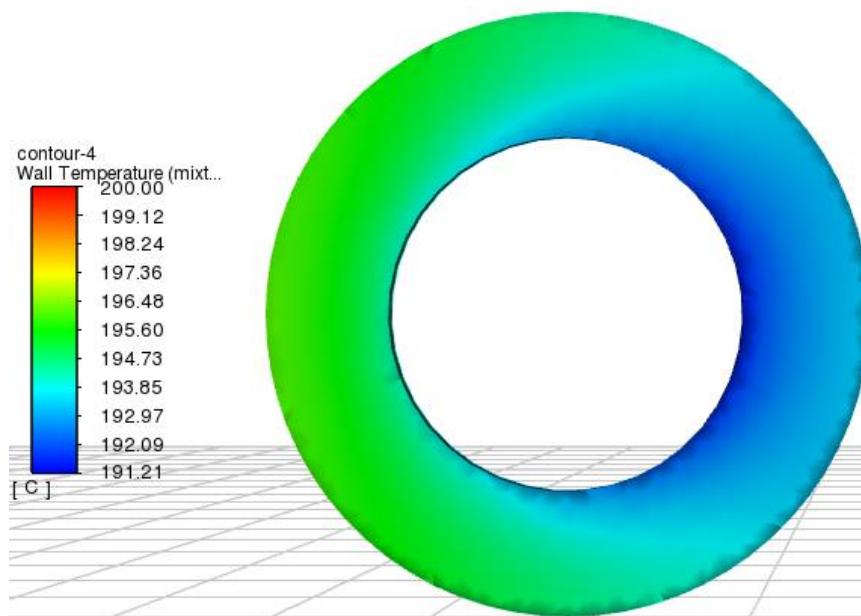
*a**б**в*

Рис. 12. Распределение диффузионного потока воды (*a*), массовой концентрации воды (*б*) и температуры стенки на поверхности ребра (*в*)

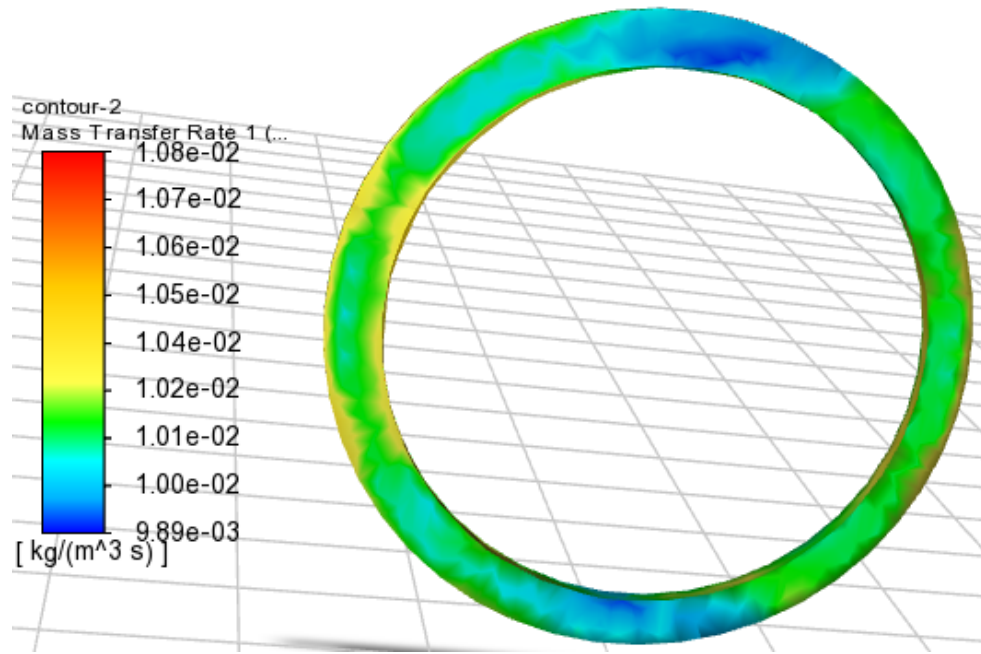
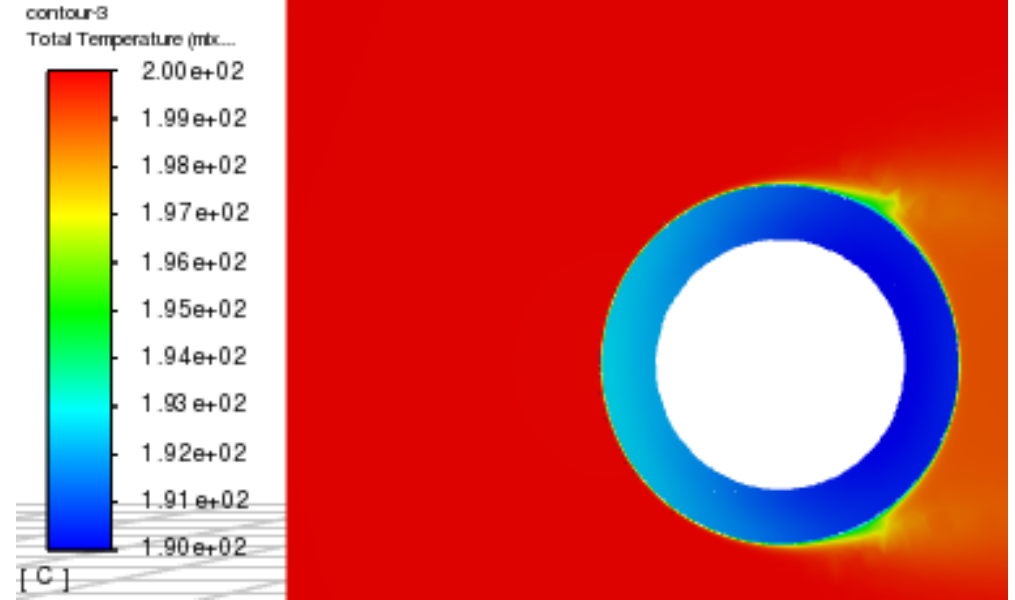
*a**б*

Рис. 13. Распределение диффузионного потока воды (*a*) и температуры текучей среды (*б*)

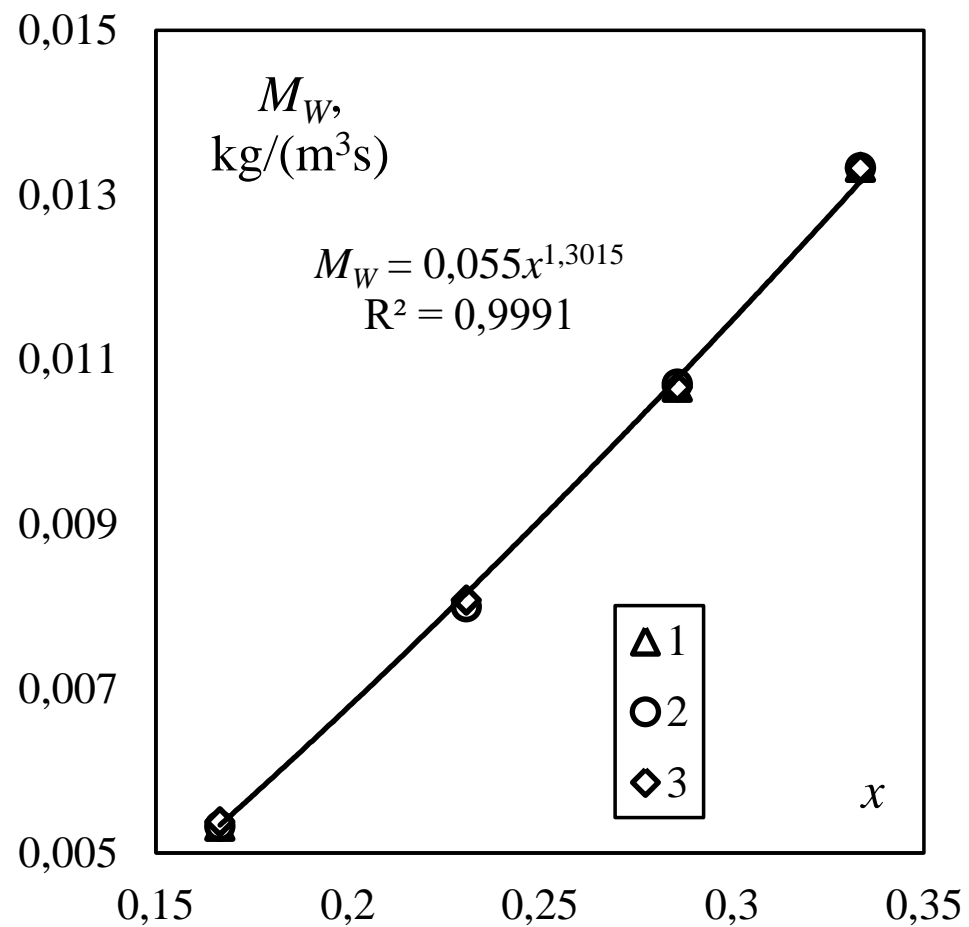


Рис. 14. Зависимость удельного диффузионного потока от массовой концентрации воды на входе в паровоздушной смеси при различных значениях диаметра ребра. D_r , м: 1 – 0,027; 2 – 0,03; 3 – 0,043.

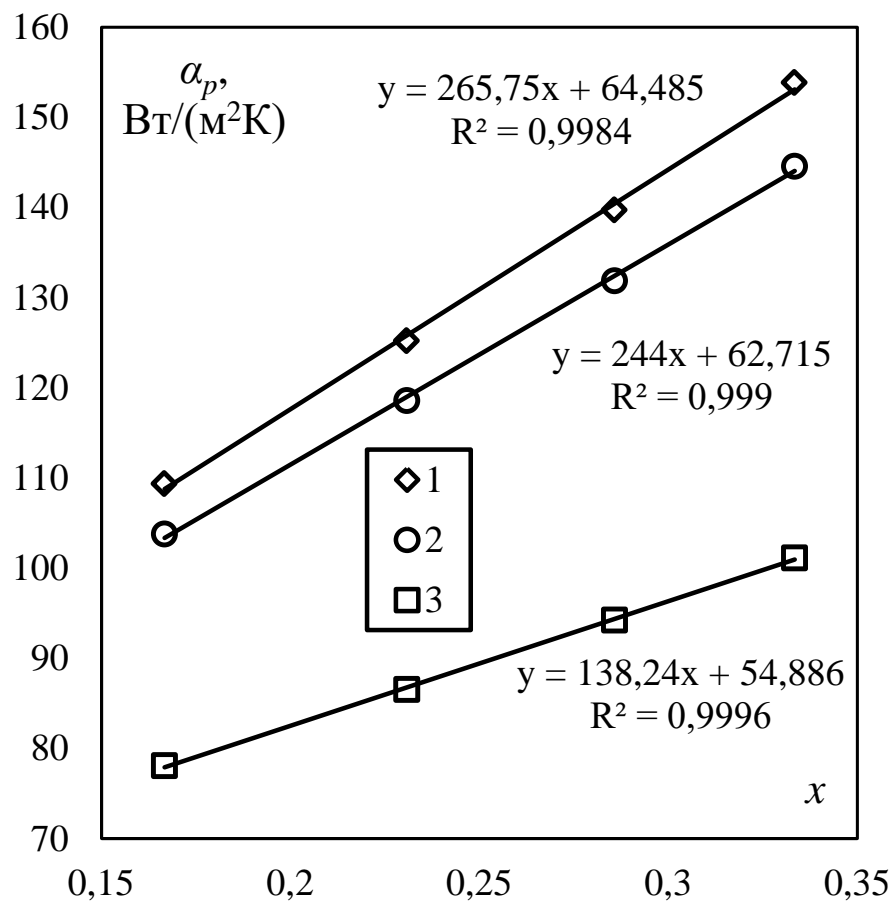


Рис. 15. Зависимость коэффициента теплоотдачи к оребренной поверхности от массовой доли воды в паровоздушной смеси при различных значениях диаметра ребра. D_r , м: 1 – 0,027; 2 – 0,03; 3 – 0,043.

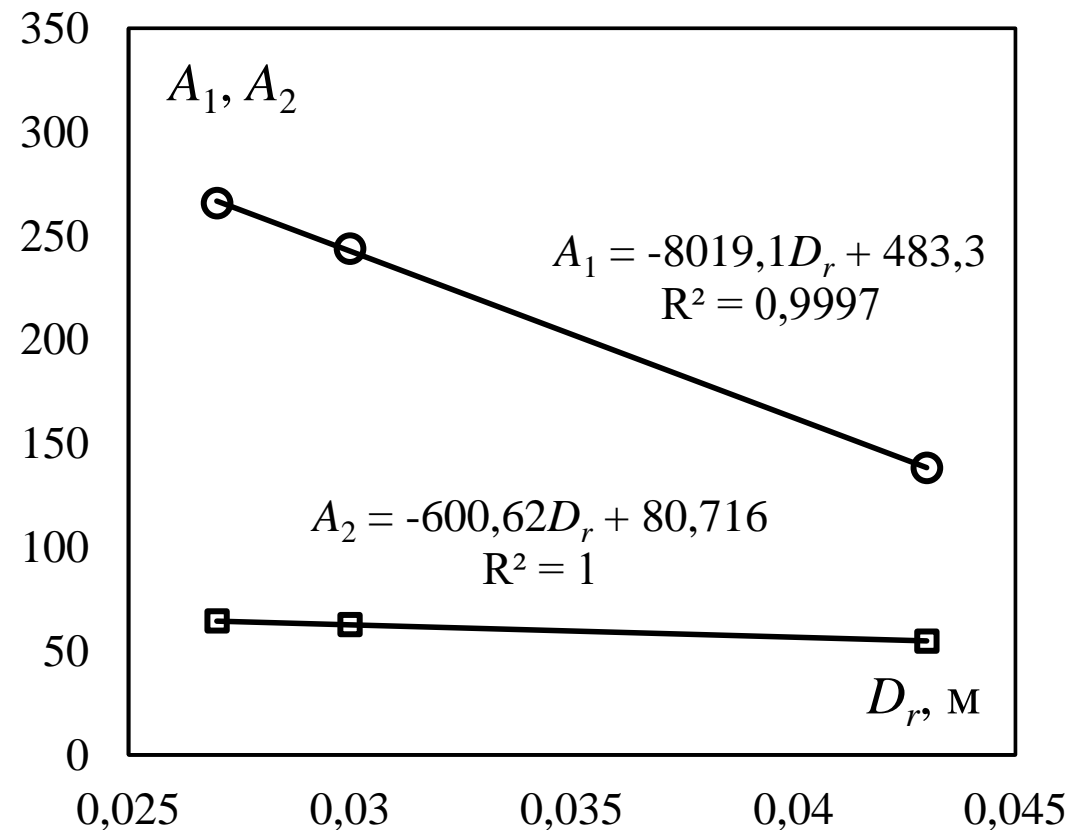


Рис. 16. Зависимость параметров A_1 и A_2 от диаметра ребра D_r .

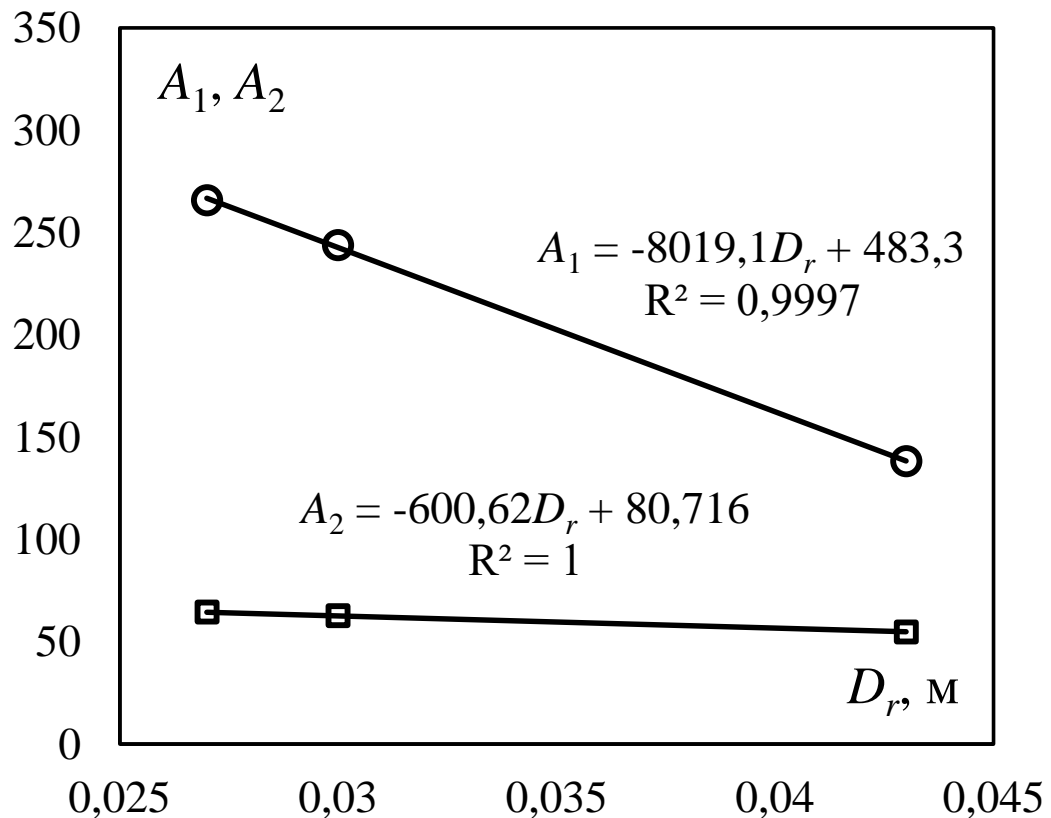


Рис. 17. Зависимость параметров A_1 и A_2 от диаметра ребра D_r .

$$\alpha_p = A_1 x + A_2 \quad (8)$$

Подставив параметры A_1 и A_2 в зависимость, получается:

$$\alpha_p = (483,3 - 8019,1D_r)x - 600,62D_r + 80,716 \quad (9)$$

Методика режима восстановления поверхности оребренных труб от загрязнений

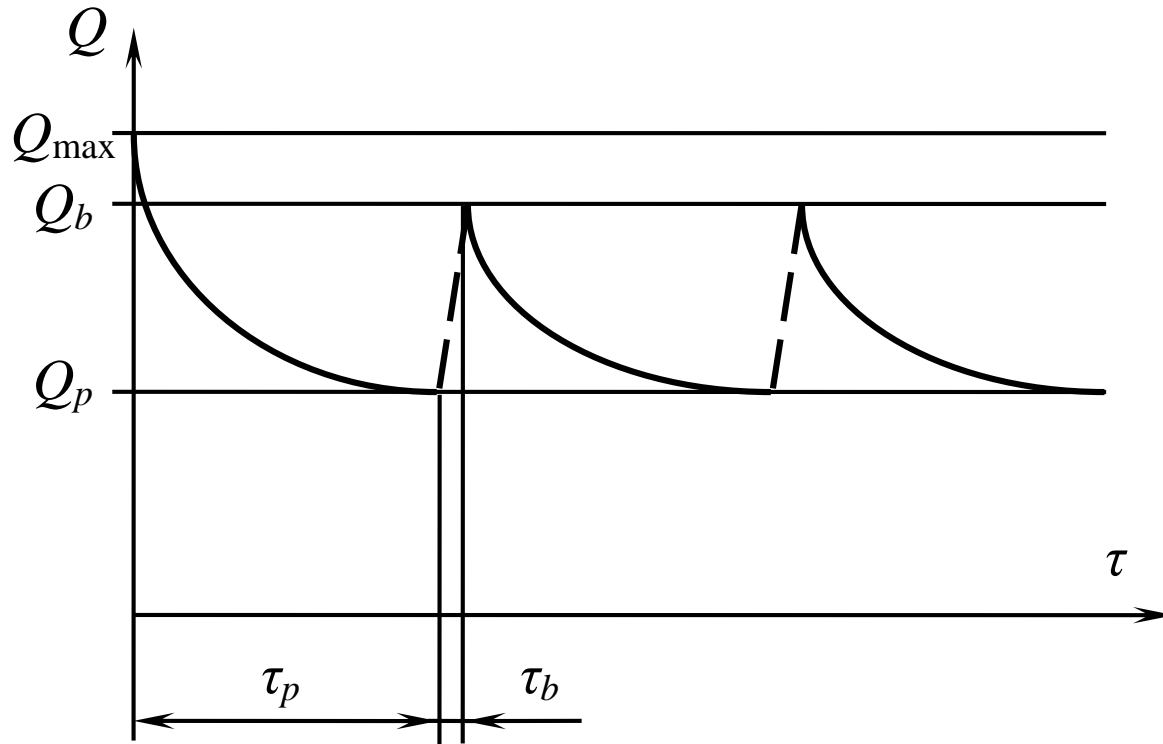


Рис. 18. График распределения потока
тепла во времени

Время работы между процессом восстановления поверхности определяется:

$$\tau_p = -\frac{1}{B} \ln \left(1 - \frac{P_{V1} V_1 B}{P_1 Q_b} \right)$$

где P_{V1} — стоимость использования воды руб./м³; P_1 — стоимость единицы энергии, руб./Дж; V_1 — объем воды, затрачиваемый на одно восстановление поверхности, м³; Q_b — значение восстановленного потока, Вт; $B = -\frac{1}{\tau_{1/2}} \ln \left(\frac{1}{2} \right)$

Результаты исследования

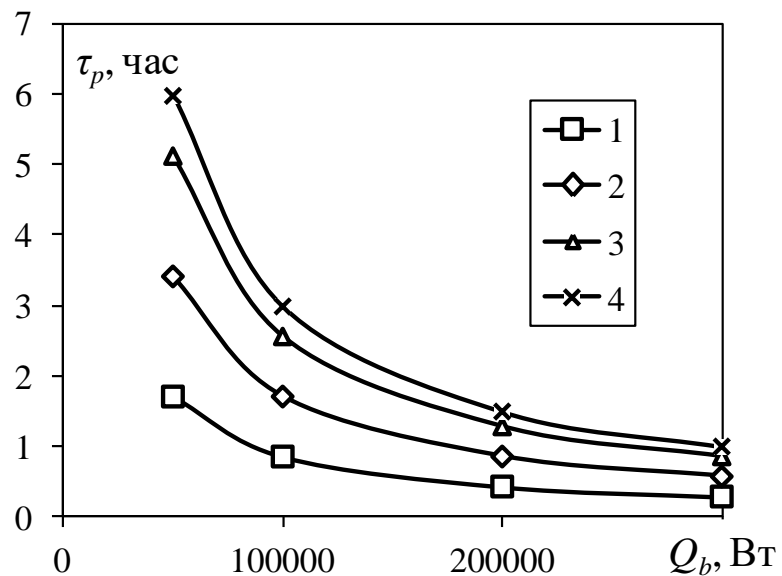


Рис. 19. Зависимость времени работы между процессом восстановления от теплового потока и объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности.

$P_{V1} = 750$ руб./м³; $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; V_1 , м³: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 1,5; 4 – 1,75

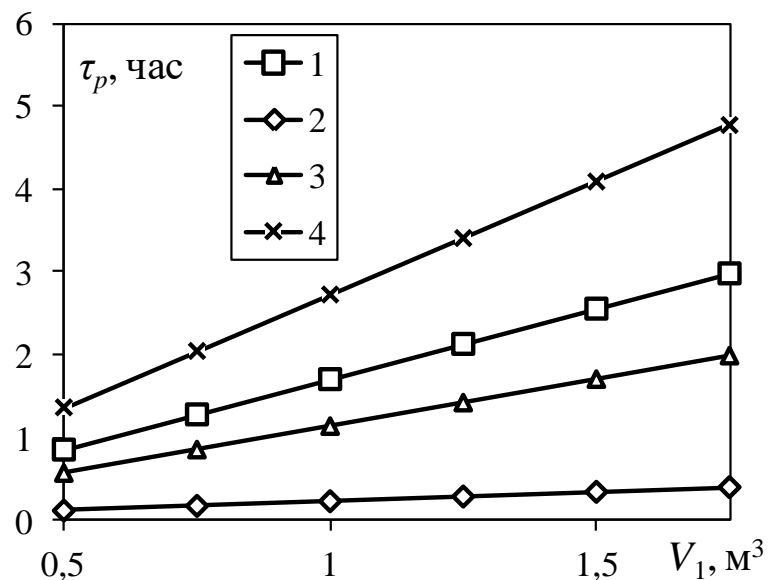


Рис. 20. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды. $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $Q_b = 100$ кВт. P_{V1} , руб./м³: 1 – 750; 2 – 100; 3 – 500; 4 – 1200

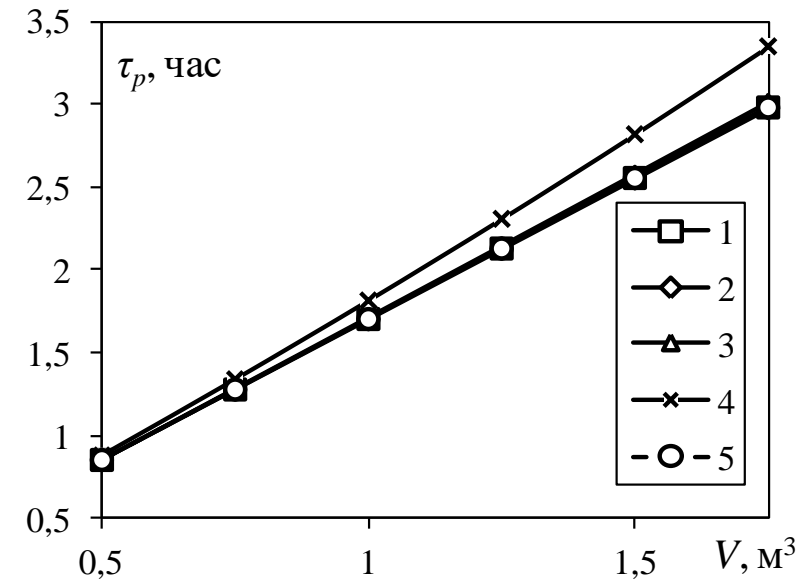


Рис. 21. Зависимость времени работы между процессом восстановления от объема воды затрачиваемой на одно восстановление поверхности и стоимости использования воды. $P_{V1} = 750$ руб./м³; $P_1 = 1,23 \cdot 10^{-6}$ руб./Дж; $B = 2,7 \cdot 10^{-7}$ 1/с; $Q_b = 100$ кВт. B , 1/с: 1 – $2,7 \cdot 10^{-7}$; 2 – $2 \cdot 10^{-8}$; 3 – $2 \cdot 10^{-6}$; 4 – $2 \cdot 10^{-5}$

Выводы

- Разработана математическая модель процесса формирования осадка на наружной поверхности оребренных труб теплообменника при конденсации паровоздушной смеси, содержащей твердые частицы целлюлозы.
- Проведено численное моделирование интенсивности теплоотдачи для ребер с различной геометрией. Получены значимые для исследования зависимости коэффициента теплоотдачи.
- Проведено численное моделирование конденсации воды из паровоздушной смеси на поверхности с кольцевыми круглыми прямыми ребрами постоянной толщины.
- Разработана методика расчета времени восстановления поверхности трубы с оребрением от твердых частиц путем смывания водой.
- Полученные результаты позволят проанализировать расположение установки форсуночных устройств в корпусе теплообменного оборудования, а также оценить расход воды, необходимый для очистки загрязненной поверхности оребренных труб.



Спасибо за внимание!



Бадретдинова Гузель Рамилевна
Аспирант кафедры
«Автоматизация технологических процессов и
производств» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

- Тел. 89867147958
- [E-mail: nice.badretdinova@mail.ru](mailto:nice.badretdinova@mail.ru)
- vk.com/gr.badretdinova