

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

# **БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

Сборник статей  
III Всероссийской с международным участием  
молодёжной конференции

**12–14 декабря 2023 г.**

Томск 2023

УДК 621.31(063)  
ББК 31л0  
Б93

**Б93 Бутаковские чтения** : сборник статей III Всероссийской с международным участием молодёжной конференции / под ред. А.С. Ивашутенко ; Томский политехнический университет. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2023. – 606 с.

Сборник посвящён теоретическим и практическим проблемам цифровой энергетики и интеллектуальным энергетическим системам, теплофизическим спектрам энергетических технологий, производству тепловой и электрической энергии, экологическим проблемам энергетики, энергетическим системам и комплексам, энергосбережению и энергоэффективности, а также новациям инженерного образования.

Представлен широкий круг исследований аспирантов, студентов и молодых учёных Томска и ряда других городов России.

**УДК 621.31(063)**  
**ББК 31л0**

*Редакционная коллегия*

Ивашутенко А.С.	– к.т.н., заместитель директора по развитию, ИШЭ ТПУ, председатель
Аршинова О.Ю.	– главный технический редактор
Сулайманова В.А.	– ассистент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ
Жданова А.О.	– к.ф.-м.н., доцент ИШФВП ТПУ
Цибульский С.А.	– к.т.н., доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ
Марышева Я.В.	– инженер научно-исследовательского центра «Экоэнергетика 4:0» ИШЭ ТПУ
Тютёва П.В.	– к.т.н., доцент отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ
Савостьянова Л.В.	– к.т.н., зав. лабораторией организационного отдела ИШЭ ТПУ
Шолохова И.И.	– ст. преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ
Гречушников В.В.	– ст. преподаватель отделения электроэнергетики и электротехники ИШЭ ТПУ

## Секция 2

# Теплофизические аспекты энергетических технологий

### ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ КРУГЛОГО РЕБРА НА ТЕПЛОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОВАЗОВОЙ СМЕСИ

Г.Р. Бадретдинова

*Казанский государственный энергетический университет,  
ИТЭ, АТПП, гр. АТа-1-21*

Научный руководитель: А.В. Дмитриев, д.т.н., заведующий кафедрой «АТПП»

На сегодняшний день одним из приоритетных направлений в энергетике является энерго-сбережение и энергоэффективность, роль которых заключается в сохранении энергии и полезном ее расходовании с максимальной эффективностью. Для этого энергетические компании разрабатывают комплекс мер, направленные на эффективное и рациональное использование своих ресурсов [1]. С появлением энергосберегающих технологий у компаний появилась возможность достигать экономическую эффективность, повышать рентабельность производства, а также снижать влияние на окружающую среду.

В данной работе рассматривается проблема снижения тепловой эффективности теплообменного оборудования вследствие загрязнения ее рабочей ребренной поверхности твердыми частицами целлюлозы при конденсации парогазовой смеси. Исследования по данной проблеме рассмотрены в работах [2–4]. В работе [5] авторами изучен процесс загрязнения трубы с ребренной поверхностью при конденсации, содержащей твердые частицы. Авторами представлено автомодельное решение в виде безразмерной функции одной переменной. Получены уравнения, описывающие распределение толщины осадка и температуры на прямом ребре неограниченной высоты при первоначально чистой поверхности.

В статье [6] проведен анализ для изучения влияния конфигурации ребристых каналов и расстояния между ними с четырьмя рядами, расположенными в шахматном порядке. Установлено, что труба с треугольными ребрами и расстоянием между ними, равным 1,6 мм обеспечивает более высокую эффективность процесса теплопередачи с квадратными и круглыми ребрами. В работе [7] проведены сравнительные расчеты эксцентрических и концентрических пучков труб с круглыми ребрами. Исследования показывают, что лучшее расположение трубы в круглом ребре достигается в задней части ребра на расстоянии 2,5 мм от его центра. Авторы статьи [8] исследовали теплообменные характеристики канала с волнистыми ребрами. Изучено влияние геометрических параметров ребра на процесс теплопере-

дачи и перепад давления. Результаты показывают, что высота, радиус и угол ребра оказывают большое влияние на теплообмен, а влияние толщины ребра относительно невелико. Также установлено, что волнистые ребра с большой высотой и большим радиусом скругления ребер лучше повышают процесс теплопередачи и уменьшают перепад давления. В работе [9] авторами исследована модель турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы с различной геометрией ребер. Полученные результаты показали, что трубы со спиральным оребрением позволяют увеличить интенсивность теплоотдачи до 40 %.

Целью работы является исследование влияния геометрических размеров ребра на относительный тепловой поток при конденсации парогазовой смеси.

В данном исследовании рассмотрено тонкое круглое ребро диаметром  $d = 26,9$  мм. Температура в основании ребра принимается постоянной  $t_0 = \text{const}$  (рис. 1). Парогазовая смесь, содержащая твердые частицы, обтекает круглые ребра. На обеих сторонах ребра происходит конденсация пара, причём на его поверхности оседают загрязнения.

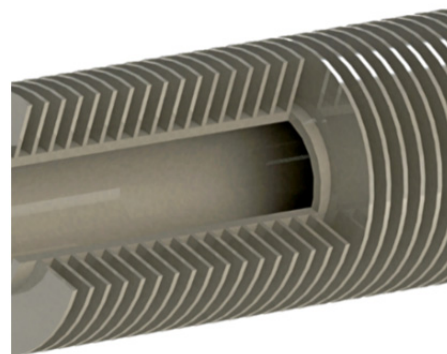


Рис. 1. Оребренная труба

В работе была построена модель процесса, определяющая относительный тепловой поток, отводимый ребром к трубе. Были установлены зависимости изменения относительного теплового потока от толщины ребра  $\delta_p = 0,5 \cdot 10^{-3}, 1 \cdot 10^{-3}, 2 \cdot 10^{-3}$  и высоты ребра  $L = 0,003, 0,013, 0,03$  м. Базовыми параметрами, при которых выполнялись вычисления, приняты  $\delta_p = 1 \cdot 10^{-3}$  м и  $L = 0,013$  м.

Получено выражение для общего относительного теплового потока, отводимого ребром  $Q_0/\Lambda$ :

$$Q_0 / \Lambda = 2\pi \cdot \left[ \frac{\theta_0 - \vartheta_{i=1}}{\Delta r} \cdot (R_0 + \Delta r / 2) + \theta_0 \cdot \frac{2 \cdot \lambda_o}{\Lambda} \cdot \frac{R_0 \cdot \Delta r}{2\delta_{i=0}} \right].$$

В ходе проведения исследования установлено, что значительные изменения теплового потока наблюдаются в первые 10 суток с увеличением высоты ребра (рис. 2). При базовых значениях высоты ребра и  $L = 0,03$  м, значения теплового потока схожи на протяжении всех 72 суток. Значения теплового потока при базовых значениях и  $L = 0,003$  м схожи вплоть до первых четырех суток, разность показателей начинает увеличиваться и доходит до значения 1000 к 31 суткам и далее держится в этом диапазоне. Из этого можно сделать вывод, что изменения высоты ребра менее чем на порядок не существенно влияют на поток, при увеличении высоты ребра более чем на порядок, наблюдается увеличение теплового потока.

Уменьшение толщины ребра приводит к увеличению относительного теплового потока (рис. 3). Значительные изменения теплового потока наблюдаются в первые 5 суток, по истечении этого времени показатели изменяются не существенно, без резких перепадов, при этом тепловой поток начиная с пятых по семьдесят вторые сутки изменяется примерно на 1500.

По результатам исследования были выявлены закономерности влияния конструктивных параметров оребренной трубы на относительный тепловой поток, отводимый ребром к трубе. Изменения высоты ребра менее чем на порядок не существенно влияют на поток, при увеличении высоты ребра более чем на порядок, наблюдается увеличение теплового потока. Уменьшение толщины ребра приводит к увеличению относительного теплового потока. Значительные изменения теплового потока при изменении толщины ребра наблюдаются в первые 5 суток. Увеличение коэффициента теплопроводности осадка приводит к увеличению теплового потока, а увеличение коэффициента теплопроводности ребра – к его уменьшению.

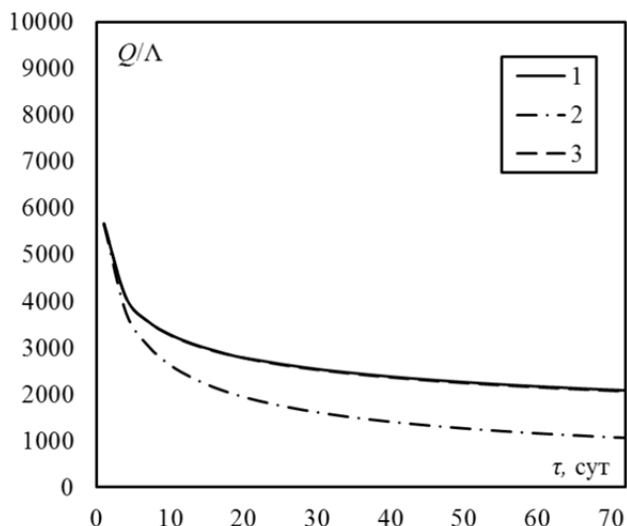


Рис. 2. Зависимость теплового потока от высоты ребра  $L$ , м:  
1 – 0,013; 2 – 0,003; 3 – 0,03

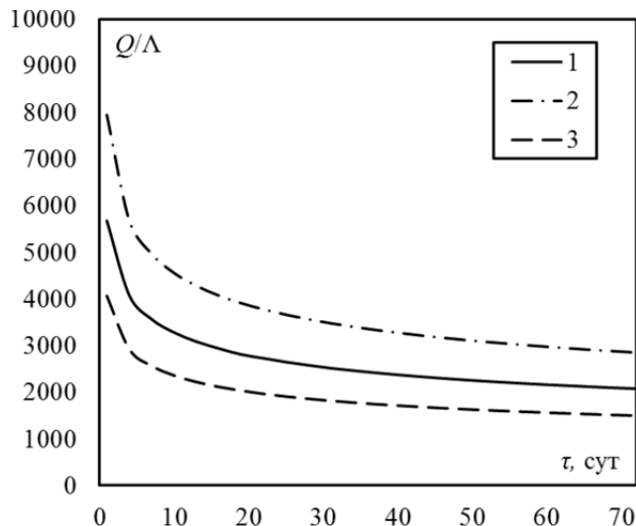


Рис. 3. Зависимость теплового потока от толщины ребра  $\delta_p$ , м:  
1 –  $1 \cdot 10^{-3}$ ; 2 –  $0,5 \cdot 10^{-3}$ ; 3 –  $2 \cdot 10^{-3}$

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Восстановление поверхности теплообмена в условиях ее загрязнения при конденсации парогазовой смеси / А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, С.Д. Борисова, А.Н. Николаев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 1. – С. 176–185.
2. A numerical model for convective-condensation heat transfer of flue gas and its application on fin efficiency calculation / K. Yang, J. Yang, L. Han, H. Liu, L. Zhou, S. Yu, L. Deng, D. Che // Numerical Heat Transfer, Part A: Applications. – 2023. – P. 1–20.
3. Enhancement of condensation heat transfer rate of the air-steam mixture on a passive condenser system using annular fins / Y.J. Jang, D.J. Choi, S. Kim, M.T. Hyun, Y.G. Lee // Energies. – 2017. – V. 10. – No. 11. – P. 1777.
4. Condensation heat transfer characteristics of moist air outside 3-D finned tubes with different wettability / Y. Gu, Y. Ding, Q. Liao, Q. Fu, X. Zhu, H. Wang // Energy. – 2020. – V. 207. – P. 118202.
5. Особенности решения задачи о конденсации пара, содержащего твёрдые частицы на ребре / Н.Д. Якимов, А.В. Дмитриев, Г.Р. Бадретдинова, С.Д. Борисова // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2022. – Т. 24. – № 3. С. 121–129.
6. Al Doori W.H. Numerical estimation of pressure drop and heat transfer characteristics in annular-finned channel heat exchangers with different channel configurations // Heat Transfer–Asian Research. – 2019. – V. 48. – No. 4. – P. 1280–1291.
7. Comparison of thermal and hydraulic performances of eccentric and concentric annular-fins of heat exchanger tubes / A.H. Benmachiche, F. Tahrour, F. Aissaoui, M. Aksas, C. Bougriou // Heat and Mass Transfer. – 2017. – V. 53. – P. 2461–2471.
8. Effects of continuous wavy ribs on heat transfer and cooling air flow in a square single-pass channel of turbine blade / L. Wang, S. Wang, F. Wen, X. Zhou, Z. Wang // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2018. – V. 121. – P. 514–533.
9. Оценка моделей турбулентности при внешнем обтекании нагреваемой трубы / Г.Р. Бадретдинова, И.Р. Калимуллин, В.Э. Зинуров, А.В. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2023. – Т. 25. – № 2. – С. 176–186.

Научное издание

## **БУТАКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

Сборник статей  
III Всероссийской с международным участием  
молодёжной конференции

12–14 декабря 2023 г.

Компьютерная верстка *О.Ю. Аршинова*

**Зарегистрировано в Издательстве ТПУ**

**Размещено на корпоративном портале ТПУ  
в полном соответствии с качеством предоставленного оригинал-макета**



**Издательство**

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ