

УДК 62-94

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки, сельскохозяйственные науки)

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕКУПЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА С РЕБРИСТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Коньшева Анна Витальевна
студент, SPIN – код автора: 8593-6776

Хамитова Динара Вилевна
Канд. техн. наук, доцент
SPIN – код автора: 7877-0874
Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия

В статье рассматривается численное моделирование оребренного рекуперативного теплообменного аппарата, который может широко использоваться в агропромышленном комплексе. Актуальность исследования обусловлена высокой энергоемкостью процессов в аграрном секторе и необходимостью повышения их энергоэффективности. Одним из перспективных направлений для оптимизации энергозатрат является использование теплообменных аппаратов, обеспечивающих эффективную теплопередачу. Основное внимание в исследовании уделено влиянию скорости парогазовой смеси и массовой доли воды на коэффициент теплоотдачи при конденсации пара на поверхности оребренного теплообменника. Для анализа была разработана трёхмерная модель теплообменного аппарата, которую протестировали в программной среде ANSYS Fluent. Для оптимизации расчётных ресурсов модель была упрощена с учётом периодичности геометрии. Результаты моделирования показали, что увеличение скорости парогазовой смеси от 7,4 до 14,7 м/с приводит к снижению коэффициента теплоотдачи, что связано с усилением турбулентных явлений и срывом жидкой пленки конденсата с поверхности ребер. Увеличение массовой доли воды в парогазовой смеси от 0,19 до 0,41 приводит к снижению эффективности теплообмена. Коэффициент теплоотдачи уменьшается с 103,8 Вт/(м²·°C) до 68,4 Вт/(м²·°C)

Ключевые слова: РЕКУПЕРАТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕННЫЙ АППАРАТ, ОРЕБРЕННАЯ ПОВЕРХНОСТЬ, АГРОПРОМЫШЛЕННЫЙ КОМПЛЕКС, ТЕПЛООТДАЧА, ПАРОГАЗАВАЯ СМЕСЬ, КОНДЕНСАЦИЯ

<http://dx.doi.org/10.21515/1990-4665-201-037>

<http://ej.kubagro.ru/2024/07/pdf/37.pdf>

UDC 62-94

4.3.1. Technologies, machinery and equipment for the agro-industrial complex (technical sciences, agricultural sciences)

NUMERICAL MODELING OF A FINNED SURFACE REGENERATIVE HEAT EXCHANGER

Konysheva Anna Vitalevna
Student, RSCI SPIN-code: 8593-6776

Khamitova Dinara Vilevna
Cand.Tech.Sci., associate professor
RSCI SPIN-code: 7877-0874
Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

The article discusses the numerical modeling of a finned regenerative heat exchanger, which can be widely used in the agro-industrial complex. The relevance of the study is due to the high energy consumption of processes in the agricultural sector and the need to improve their energy efficiency. One of the promising directions for optimizing energy costs is the use of heat exchangers that provide efficient heat transfer. The study focuses on the influence of steam-gas mixture velocity and water mass fraction on the heat transfer coefficient during steam condensation on the finned heat exchanger surface. A three-dimensional model of the heat exchanger was developed for analysis and tested in the ANSYS Fluent software environment. To optimize computational resources, the model was simplified, considering the periodicity of the geometry. The modeling results showed that increasing the steam-gas mixture velocity from 7.4 to 14.7 m/s leads to a decrease in the heat transfer coefficient, which is associated with increased turbulence and disruption of the liquid condensate film from the fin surface. An increase in the water mass fraction in the steam-gas mixture from 0.19 to 0.41 leads to a reduction in heat exchange efficiency. The heat transfer coefficient decreases from 103.8 W/(m²·°C) to 68.4 W/(m²·°C)

Keywords: REGENERATIVE HEAT EXCHANGER, FINNED SURFACE, AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX, HEAT TRANSFER, STEAM-GAS MIXTURE, CONDENSATION

Введение. Агропромышленный комплекс представляет собой одну из ключевых отраслей экономики, которая характеризуется высокой энергоемкостью производственных процессов. Энергия используется на всех этапах производства – от выращивания и переработки сельскохозяйственной продукции до её хранения, транспортировки и реализации. В условиях стремительного роста цен на энергоресурсы и необходимости минимизации углеродного следа особую значимость приобретает задача повышения энергоэффективности агропромышленных процессов. Одним из перспективных решений для достижения этой цели является внедрение рекуперативных теплообменных аппаратов.

Рекуперативные теплообменники позволяют существенно сократить потери энергии за счёт эффективного обмена теплом между потоками без их прямого контакта. Это исключает риск загрязнения продукта и обеспечивает безопасное повторное использование тепла в технологических процессах. Применение таких теплообменников в агропромышленном комплексе открывает широкие возможности для оптимизации энергозатрат.

В качестве альтернативы теплообменники могут быть интегрированы в системы тепличных хозяйств для эффективного использования накопленной энергии и поддержания стабильных температурных условий на протяжении всего года. Это особенно важно в зимние месяцы, когда расходы на отопление теплиц значительно возрастают. Использование таких аппаратов также способствует улучшению условий хранения сельскохозяйственной продукции, обеспечивая постоянный уровень температуры и влажности, что помогает минимизировать потери и продлить срок хранения продукции.

Состояние исследований и актуальность проблемы. В последние десятилетия исследование и разработка рекуперативных теплообменных аппаратов стали важным направлением в области повышения

энергоэффективности промышленных процессов. В агропромышленном комплексе эти аппараты способны существенно уменьшить затраты энергии на ключевые технологические процессы, такие как сушка зерна, вентиляция и отопление теплиц, а также охлаждение и консервация сельскохозяйственной продукции. Современные исследования подтверждают, что внедрение таких аппаратов позволяет значительно снизить эксплуатационные расходы и уменьшить выбросы углекислого газа, что является важным аспектом в контексте экологической устойчивости.

Существуют разнообразные конструкции рекуперативных теплообменников, включая пластинчатые, трубчатые, оребренные и спиральные аппараты, которые демонстрируют высокую эффективность в различных условиях эксплуатации. Каждый тип теплообменника имеет свои особенности и преимущества в зависимости от специфики использования. Пластинчатые теплообменники популярны за счёт своей компактности и высокой теплопередачи при сравнительно небольших габаритах. Трубчатые теплообменники характеризуются высокой прочностью и устойчивостью к агрессивным средам. Оребренные теплообменники, благодаря увеличенной площади теплообмена, обеспечивают ещё более эффективную передачу тепла, что делает их особенно востребованными в агропромышленном комплексе.

Одним из направлений, которое позволяет эффективно исследовать и оптимизировать применение теплообменных аппаратов, является использование численных пакетов для компьютерного инжиниринга CAE. Эти программные решения предоставляют широкие возможности для моделирования и анализа тепловых процессов внутри теплообменников, учитывая разнообразные параметры, такие как скорость и температура потоков, геометрические особенности аппаратов, материал конструкций и другие факторы. Применение CAE - пакетов позволяет не только

прогнозировать поведение теплообменника в реальных условиях эксплуатации, но и выявлять наиболее эффективные конструкции и режимы работы. Это способствует повышению производительности и снижению затрат на энергопотребление, что особенно важно для агропромышленного комплекса, т. к. экономия ресурсов напрямую влияет на себестоимость продукции.

В работе [1] предложен теплообменный аппарат с оребренной поверхностью (рис. 1).



Рисунок 1 – Изготовленный теплообменный аппарат с ребристой поверхностью

Ребристая поверхность теплообменного аппарата позволяет значительно увеличить площадь теплопередачи, что позволяет улучшить теплотехнические характеристики аппарата. Использование оребренной поверхности способствует уменьшению размеров теплообменника при сохранении его высокой производительности.

Цель исследований. Исследование передачи тепловой энергии через ребристую поверхность при различной скорости движения пара.

Материалы и методы исследований. Численное моделирование проводилось в программной среде ANSYS Fluent, которая является мощным инструментом для анализа тепломассообменных процессов.

Для проведения численного моделирования оребренного теплообменного аппарата, представленного на рисунке 1, была

разработана трехмерная модель данной установки. Ввиду того, что геометрия теплообменника неизменна по сечению вдоль его длины, для оптимизации расчётных ресурсов модель была обрезана. На боковых стенках обрезанной модели было задано условие периодичности, что позволяет корректно смоделировать процесс теплопередачи при уменьшении вычислительных затрат.

Твердотельная модель теплообменного аппарата была помещена в имитационный куб, который представляет собой замкнутый объём, используемый для воспроизведения условий работы теплообменника в реальной установке. Это позволяет смоделировать аналогичное движение воздушного потока в воздуховоде, по которому снизу вверх движется парогазовая смесь. Внутри теплообменного аппарата циркулирует вода, которая принимает на себя тепловую нагрузку от парогазовой смеси.

В процессе моделирования скорость движения пара задавалась в диапазоне от 7,4 до 14,7 м/с. Температура пара была установлена на уровне 220°C, что типично для ряда промышленных применений, включая агропромышленный комплекс.

Для обеспечения точности расчетов и корректного отображения всех тепловых и гидродинамических процессов в области теплообменника была выбрана адаптивная сетка с высокой плотностью элементов вблизи оребренной поверхности и в зонах возможного образования турбулентных потоков. Это позволило более детально проанализировать поведение конденсата на поверхности теплообменника и его влияние на общую эффективность теплообмена.

Для повышения достоверности модели были использованы данные из существующих экспериментальных исследований, которые служили в качестве контрольных точек для верификации результатов.

Результаты исследований. В ходе проведения моделирования была получена визуализация стекания воды по оребренной поверхности

теплообменного аппарата при конденсации пара (рис. 2). Видно, что конденсат распределяется неравномерно, с наибольшей концентрацией на передней части оребрения, что обусловлено особенностями аэродинамики парогазовой смеси и локальным распределением температуры. Зоны с повышенной плотностью конденсата (отмеченные красным цветом) указывают на области наиболее интенсивного теплообмена, где температура поверхности наиболее быстро снижается до точки росы пара. Области с более низкой концентрацией конденсата (отмеченные синим и зелёным цветами) указывают на менее интенсивный процесс конденсации и меньшую тепловую нагрузку.

Характер распределения конденсата значительно влияет на общую тепловую эффективность теплообменного аппарата. В частности, зоны с неравномерным распределением жидкости создают дополнительные точки термического сопротивления, что ведёт к снижению общего коэффициента теплоотдачи. Это особенно важно учитывать при проектировании и эксплуатации подобных устройств в агропромышленном комплексе, где даже небольшие изменения в эффективности теплопередачи могут существенно влиять на общие энергетические затраты.

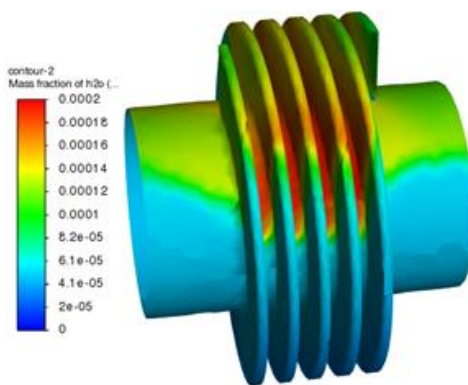


Рисунок 2 – Смоделированный процесс стекания воды по оребренной поверхности при конденсации пара

В ходе исследований было получено изменение коэффициента теплоотдачи от пара к оребренной поверхности (рис. 3). при увеличении

скорости парогазовой смеси коэффициент теплоотдачи снижается. С ростом скорости смеси возникает увеличение турбулентности и формирование хаотических вихревых структур вблизи ребрения. Данные вихревые структуры приводят к срыванию жидкой пленки конденсата с поверхности ребер, что снижает эффективность теплообмена. Поскольку конденсат в виде жидкой пленки играет важную роль в процессе передачи тепла, её нарушение приводит к ухудшению теплоотдачи.

Увеличение массовой доли воды в парогазовой смеси отрицательно сказывается на коэффициенте теплоотдачи. Более высокая массовая доля воды способствует образованию более толстой пленки конденсата на поверхности трубы. Толстая пленка конденсата создаёт дополнительное термическое сопротивление, препятствующее эффективному теплообмену между парогазовой смесью и поверхностью трубы. При значении скорости пара W равной от 7,4 до 14,7 м/с коэффициент теплоотдачи изменяется от 68,4 до 103,8 Вт/(м²·К) при значении массовой доли воды в нем от 0,19 до 0,41.

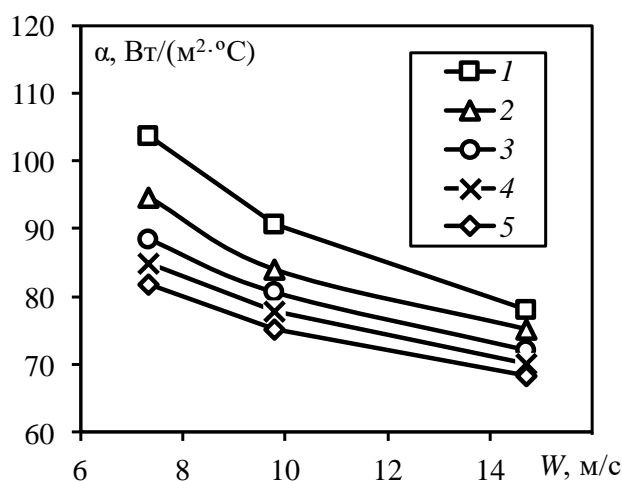


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от пара к поверхности от скорости его движения по расчетной области при различных значениях массовой доли воды в нем: 1 – 0,19; 2 – 0,26; 3 – 0,32; 4 – 0,37; 5 – 0,41

Анализ зависимости коэффициента теплоотдачи от скорости и состава парогазовой смеси позволяет сделать вывод о необходимости точной настройки режимов работы теплообменника для достижения максимальной эффективности. Эти результаты могут быть использованы для дальнейшей оптимизации конструкций ребренных теплообменников и улучшения их эксплуатационных характеристик, что позволит повысить энергоэффективность процессов в агропромышленном комплексе и снизить затраты на энергопотребление.

Выводы. 1. Увеличение скорости парогазовой смеси в диапазоне от 7,4 до 14,7 м/с приводит к снижению коэффициента теплоотдачи. Это связано с усилением турбулентных потоков и разрывом жидкой пленки конденсата на поверхности ребер, что негативно влияет на процесс теплопередачи. 2. Толстая пленка конденсата, образующаяся на поверхности трубы при высокой доле воды, создает дополнительное термическое сопротивление, снижая эффективность теплообмена. 3. При изменении массовой доли воды от 0,19 до 0,41 коэффициент теплоотдачи уменьшается с 103,8 Вт/(м²·°С) до 68,4 Вт/(м²·°С).

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-20061, <https://rscf.ru/project/24-29-20061/>.

Библиографический список

1. Зинуров, В. Э. Экспериментальное исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, И. И. Шарипов, А. Р. Галимова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 2 (26). С. 60-74.

References

1. Zinurov, V. Je. Jeksperimental'noe issledovanie teploobmena ot parogazovoj smesi pri peredache tepla cherez rebristuju poverhnost' / V. Je. Zinurov, A. V. Dmitriev, I. I. Sharipov, A. R. Galimova // Vestnik Tjumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, jenergetika. 2021. Tom 7. № 2 (26). S. 60-74.