

DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-30-38

**Ильина Т.Н., Уваров В.А., Колесников М.С., Евраев Д.А., Кретова В.С.
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
E-mail: ilina50@rambler.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОБМЕНА В РЕКУПЕРАТОРЕ ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

Аннотация. Рассмотрены рекуператоры, включающие теплообменники различных типов. Показана перспективность использования теплообменников типа «труба в трубе» для утилизации тепловых выбросов, содержащих значительные количества влаги и газовых выделений, например, аммиака, что характерно для животноводческих комплексов. При контакте теплоносителей с разными температурами на стенках теплообменника происходит конденсация паров влаги и растворение в ней газообразного аммиака. Удаляемый воздух подается во внутреннюю трубу, конденсат в виде аммиачной воды удаляется в нижней части установки, а охлажденный и очищенный воздух выбрасывается через верхний патрубок в атмосферу. На основании теории подобия разработана модельная установка. С помощью программного комплекса SolidWorks Flow Simulation проведено исследование влияния гидродинамических и теплофизических свойств теплоносителей на теплообменные процессы. Температуры холодного теплоносителя составляли от -5 до -23 °С, (наружного воздуха), температура теплового теплоносителя (удаляемого воздуха) составляет $+25$ °С. Установлено, что для исключения обмерзания внутренней поверхности теплообменника температура подаваемого в наружный трубопровод воздуха должна быть выше -10 °С. Для повышения коэффициента теплопередачи подачу теплоносителей целесообразно осуществлять тангенциально. При этом скорости теплоносителей в приточном и вытяжном присоединительных патрубках установки желательно поддерживать одинаковыми. Для повышения энергоэффективности установки рекомендуется разработка и совершенствование способов турбулизации потоков теплоносителей.

Ключевые слова: теплообменник, утилизация тепла, энергоэффективность, рекуператор, теплообменник «труба в трубе».

Введение. При организации микроклимата в зданиях и сооружениях важной задачей является экономия энергоресурсов. Потеря энергии, связанная с нагревом или охлаждением воздуха в жилых, общественных и производственных помещениях составляет до 70 % от всех энергозатрат на инженерные системы зданий. Достаточно широкое распространение получили системы вентиляции с теплоутилизаторами различных типов [1]. Различают пластинчатые, кожухотрубные, спиральные, типа «труба в трубе» и другие теплообменные устройства. Наиболее востребованными теплоутилизационными установками, занимающими около 58% рынка, являются пластинчатые теплообменники. Уступают им в популярности кожухотрубные и типа «труба в трубе» теплообменники с долей рынка в пределах 22-27%. Тем не менее, современные кожухотрубные теплообменники и типа «труба в трубе» по показателям эффективности, коэффициента теплопередачи и габаритам приближаются к пластинчатым и кожухопластинчатым теплообменникам [2-3]. Повысить энергоэффективность исследуемого типа теплообменника позволяет использование процесса турбулизации потока теплоносителя, а также установка перегородок в трубках и межтрубном пространстве, рифление теплообменных труб [4-5].

Целью работы является исследование влияния температуры, режима движения и способа ввода теплоносителя на энергоэффективность установки. Для этого необходимо провести моделирование процессов теплообмена в теплоутилизаторе типа «труба в трубе» при различных температурах приточного воздуха в зимний период (при -5 , -10 , -15 и -23 °С), для определения минимальной температуры приточного воздуха, при которой начинается процесс образования наледи на стенках теплообменника, а также установить зависимость коэффициента теплопередачи при различных гидродинамических и теплофизических условиях проведения процессов, что позволит определить рациональный способ введения теплоносителя за счет расположения присоединительных патрубков теплоутилизатора.

Материалы и методы. При проведении исследования активно применяется метод физического моделирования процессов теплопереноса в теплообменнике типа «труба в трубе». При этом пересчет изучаемых параметров с модели на натуру может быть получен либо на основе теории подобия, либо на основе анализа размерностей.

Физическое моделирование основано на известном понятии о подобии явлений: два явления называются подобными, если по заданным ха-

рактикам одного можно получить характеристики другого умножением на постоянные коэффициенты (масштабы, множители подобия) [6].

Достоинство этого метода, прежде всего, в том, что физическую модель зачастую сделать гораздо проще, чем создать ее математическое описание. С другой стороны, ряд явлений гораздо легче реализовать физически, нежели расчетным путем.

Основой обработки результатов физических экспериментов является – «теория подобия».

Математическое моделирование поставленной задачи рассматривается в программном комплексе SolidWorks Flow Simulation. В SolidWorks движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса (1), описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Выглядит уравнение следующим образом:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\rho g - \text{grad}P + \mu \Delta \vec{v} \quad (1)$$

Кроме того, используются числа Прандтля (2) и Нуссельта (3), которые отражают влияние свойств газа на теплообмен и интенсивность теплообмена, соответственно [7]. Данные числа выражены следующими уравнениями:

$$\frac{p'_0}{\rho'_0 R'_0 \Delta T'} = \frac{p''_0}{\rho''_0 R''_0 \Delta T''} = 1 \quad (2)$$

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} = \text{idem} \quad (3)$$

Для моделирования турбулентных течений уравнения Навье-Стокса усредняются по Рейнольдсу, т.е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности

на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения осредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени [7]. В результате уравнения включают дополнительное выражение по числу Рейнольдса (4) и преобразованное уравнение Нуссельта имеет вид (5):

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (4)$$

$$Nu = 0,147 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \quad (5)$$

Обеспечить подобие модели к образцу необходимо соблюдением следующих условий. Моделировать можно процессы, имеющие одинаковую физическую природу и описываемые одинаковыми дифференциальными уравнениями. Условия однозначности должны быть одинаковы во всем, кроме численных значений постоянных, содержащихся в этих условиях. Условия однозначности требуют: геометрического подобия образца и модели, подобия условий движения жидкости во входных сечениях образца и модели, подобия физических параметров в сходственных точках образца и модели, подобия температурных полей. Кроме того, одноименные определяющие числа подобия в сходственных сечениях образца и модели должны быть численно одинаковы.

Математическое моделирование проводилось на установке, разработанной на основе патента № 2799158 «Система вентиляции животноводческих помещений» [8]. Принципиальная схема модельной установки показана на рисунке 1.

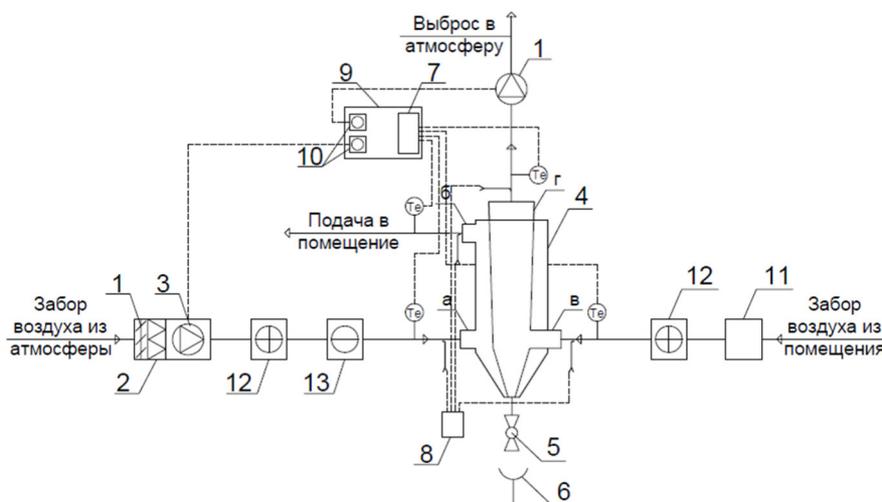


Рис. 1. Принципиальная схема модельной системы:

1 – Вентиляционная решетка; 2 – фильтр; 3 – вентилятор приточный/вытяжной; 4 – рекуперативная установка; 5 – конденсатоотводчик; 6 – отвод конденсата (канализация); 7 – термометрия (датчики температуры и панель управления); 8 – анемометр серии Testo 410; 9 – панель сбора данных и настройки оборудования; 10 – реостат вентилятора; 11 – устройство выработки аммиака; 12 – нагреватель воздуха; 13 – охладитель воздуха

Работает система следующим образом. Холодный наружный воздух, подается приточным вентилятором 3 через вентиляционную решетку 1 и фильтр 2, во внешний воздухопровод теплообменника 4 через входной патрубок «а». В теплообменном устройстве 4 приточный воздух нагревается за счет теплопередачи от удаляемого вытяжного воздуха и поступает в помещение через выпускной патрубок «б».

Вытяжной воздух удаляется из помещения через тангенциальный патрубок «в» в теплообменное устройство 4, где удаляемый воздух охлаждается, а на стенках вытяжного воздухопровода образуется конденсат с улавливанием паров аммиака. За счёт тангенциального ввода через патрубок «в» обеспечивается воздействие центробежных и инерционных сил, что способствует интенсификации тепло-массообменных процессов, образованию на стенках конденсата смешанного с парами аммиака, который в свою очередь собирается в нижней части теплообменного устройства 4 и удаляется из конденсатоотводчика 5 в систему водоотведения.

Основная часть. Важнейшей частью, предлагаемой нами системы вентиляции, является теплообменное устройство. Теплообменным аппаратом принято называть устройство, которое предназначено для обмена теплотой между греющей и обогреваемой рабочими средами, иными словами теплоносителями. Классификация теплообменных аппаратов ведется по назначению, принципу действия, фазовому состоянию теплоносителей, конструктивным и иным параметрам [9].

Предлагаемый нами теплообменный аппарат по назначению относится к подогревателям. По принципу действия аппарат является рекуператором.

Рекуператорами называются такие аппараты, в которых тепло от горячего теплоносителя к холодному передается через разделяющую их плоскую стенку. Примером таких аппаратов являются пластинчатые, кожухотрубные и типа «труба в трубе» теплообменники.

В рекуперативных аппаратах процесс передачи тепла неизбежно связан с поверхностью твердого тела. Поэтому такие аппараты еще называются поверхностными.

Если участвующие в тепломассообмене горячий и холодный теплоносители перемещаются вдоль поверхности нагрева в одном и том же направлении, тепломассообменный аппарат называют прямоточным, при встречном движении теплоносителей и сред – противоточным, а при перекрестном движении – перекрестноточным. Перечисленные схемы движения теплоносителей и сред в аппаратах называют простыми.

В том случае, когда направление движения хотя бы одного из потоков по отношению к другому меняется, говорят о сложной схеме движения теплоносителей и сред.

Разрабатываемый нами рекуперативный аппарат по направлению движения теплоносителей целесообразно отнести к сложной схеме движения сред. Из-за подачи вытяжного воздуха в устройство через тангенциальный патрубок появляется возможность повысить эффективность теплопередачи, но усложняется схема движения потоков.

При этом системы вентиляции животноводческих комплексов бывают двух видов: естественной и механической (принудительной).

В системах с естественной вентиляцией приток и вытяжка воздуха из помещения происходит без механических побудителей. В области животноводческих комплексов данный тип вентиляции получил наибольшее распространение. Однако регулировать и поддерживать требуемые параметры микроклимата в животноводческих комплексах при такой схеме вентиляции достаточно сложно. Работа естественной вентиляции основана на движении воздушных потоков за счет разности давлений наружного и внутреннего воздуха, обусловленного разностью температур [10–11]. Также существуют системы естественной вентиляции, основной движущей силой в которых является сила ветра.

Системы механической вентиляции делятся на следующие типы: системы положительного давления, системы отрицательного давления и приточно-вытяжные системы. Отличаются эти системы способом организации притока наружного и вытяжки внутреннего воздуха [12–13].

В первом случае приточный воздух подается в помещение за счет механического побудителя воздуха, а вытяжка осуществляется без вентиляторов через воздушные клапаны.

В системах отрицательного давления организация воздухообмена происходит за счет разрежения, создаваемого при удалении внутреннего воздуха вытяжными вентиляторами большой мощности, а подача наружного воздуха осуществляется через воздушные стеновые или потолочные клапаны без механического побуждения [14].

Следует отметить, что при неправильной организации такой системы вентиляции в зоне нахождения животных будет располагаться загрязненный аммиаком и прочими вредными газами воздух. А более чистый и теплый воздух будет занимать пространство в верхней части животноводческого комплекса под крышей и удаляться вытяжными вентиляторами.

Задача, на решение которой направлена предлагаемая нами схема системы вентиляции животноводческих помещений, включает повышение энергоэффективности системы и качества микроклимата за счет удаления избыточных вредностей из обслуживаемого помещения, в частности влаги и аммиака, обеспечение нормативных параметров микроклимата за счет введения в систему теплонасосной установки, позволяющей нагревать воздух в холодный период и охлаждать в теплый в соответствии с требованиями санитарных норм животноводческих предприятий [15].

Отличительными особенностями предлагаемой системы по сравнению с аналогами является: использование разрабатываемого теплообменного устройства, установленного вертикально, что позволяет эффективно собирать влагу, которая образуется на внутренней стенке аппарата, смешивается с аммиаком и периодически удаляется через оснащенный в нижней части рекуператора конденсатоотводчик в систему водоотведения.

Результаты и их обсуждение. Используя методы математического моделирования движения воздушных потоков, рассмотрим на примере теплообменного устройства в системе вентиляции животноводческого комплекса эффективность теплообмена и теплопередачи теплоносителя с учетом различных температур, скоростных режимов и способа подачи приточного или удаляемого воздуха.

При расчете теплообменной установки для помещения животноводческого комплекса были определены геометрические параметры натурной установки в соответствии с нормативными документами ГОСТ, СП, ТР и др. На основании теории подобия установлены размеры модельной установки относительно натурной. При проведении исследования была использована математическая модель теплообменного устройства (рис. 1). Такие параметры, как внутренний диаметр наружного приточного воздуховода (0,3 м), внутренний диаметр внутреннего вытяжного воздуховода (0,2 м) и параметры отработанного удаляемого воздуха ($t_y = +25\text{ }^\circ\text{C}$, $\omega = 70\%$) - оставались неизменными на протяжении множества циклов моделирования. Для удобства расчета теплообмена установки, длина участка теплоутилизатора, где протекает процесс теплопередачи, принята за 1 п.м. Расчетные характеристики теплообменной установки, участвующие в процессе моделирования тепломассообмена — площадь поверхности теплообмена, равная $0,628\text{ м}^2$, и площадь живого сечения теплообменника, равная $0,03927\text{ м}^2$.

Был проведен ряд математических моделирований процесса изменения температур потоков приточного и удаляемого воздуха при протекании процесса теплопередачи через плоскую цилиндрическую стенку. На рисунке 2 рассматривается случай, когда приточный и удаляемый воздух через входные патрубки подается перпендикулярно по отношению к каждой из труб теплообменного устройства.

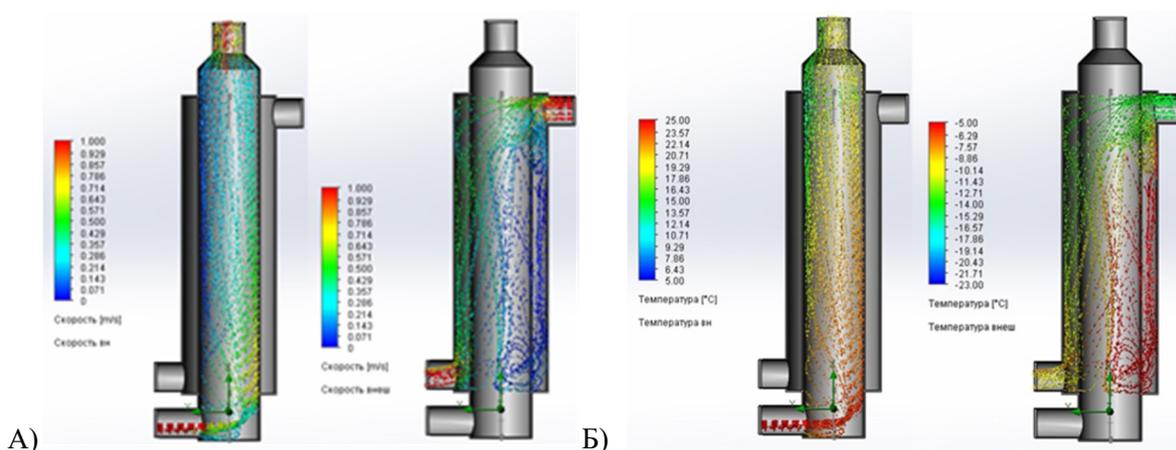


Рис. 2. Визуальное и численное изменение скорости и температуры воздушных потоков при прямом присоединении входных патрубков:

- А) изменение скорости удаляемого и приточного воздуха при $t_{пр} = -15\text{ }^\circ\text{C}$ и $V_{пр} = 1\text{ м/с}$;
 Б) изменение температуры удаляемого и приточного воздуха при $t_{пр} = -15\text{ }^\circ\text{C}$ и $V_{пр} = 1\text{ м/с}$

В данном случае распределение воздушных потоков происходит неравномерно. В некоторых частях теплообменника образуются застойные зоны, в которых скорость движения воздушных потоков практически равна нулю. Как следствие,

теплообмен происходит неэффективно, и использование такого способа присоединения патрубков нецелесообразно.

В связи с этим было принято решение патрубки приточного и вытяжного воздуховода

установить тангенциально по отношению к теплообменнику и снова провести ряд математических моделирований с принятым условно шагом изменения значений температуры приточного воздуха ($t_{пр} = -23, -15, -10$ и -5 °С). Задачей моделирования являлось определение минимальной

температуры, при которой начинался процесс обмерзания стенок внутренней трубы теплоутилизатора. Результаты моделирования теплообменного устройства при тангенциальном присоединении входных патрубков представлены на рис. 3-4.

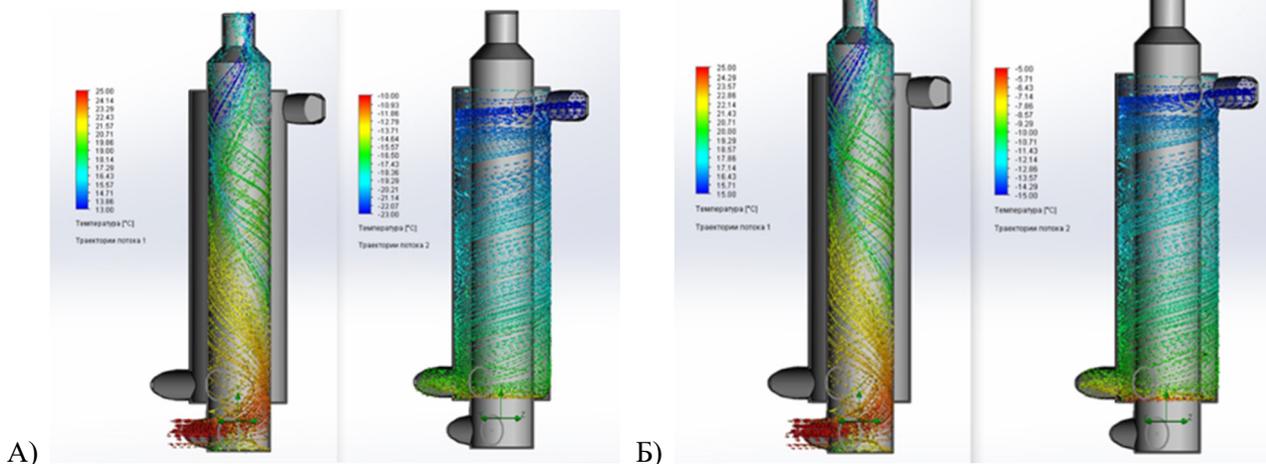


Рис. 3. Визуальное и численное изменение температуры удаляемого и приточного потоков воздуха соответственно. А) при $t_{пр} = -23$ °С и $V_{пр} = 1$ м/с, Б) при $t_{пр} = -15$ °С и $V_{пр} = 1$ м/с

Из результатов моделирования видно, что при температуре приточного воздуха равной, -23 °С (рис. 3, А), будет происходить наледение конденсата на внутренней трубе теплообменника, так как температура стенки практически всей контактируемой площади теплообмена отрицательна (от -7 °С до $-9,7$ °С в зависимости от скорости подаваемого воздуха).

При температуре приточного воздуха равной -15 °С (рис. 3, Б) средняя температура контактируемой стенки составляет $1,59$ °С. Однако в верхней части внутреннего воздуховода температура стенки напротив приточного патрубка понижается до минимального значения, равного $-3,76$ °С, что свидетельствует о начале процесса обмерзания конденсата.

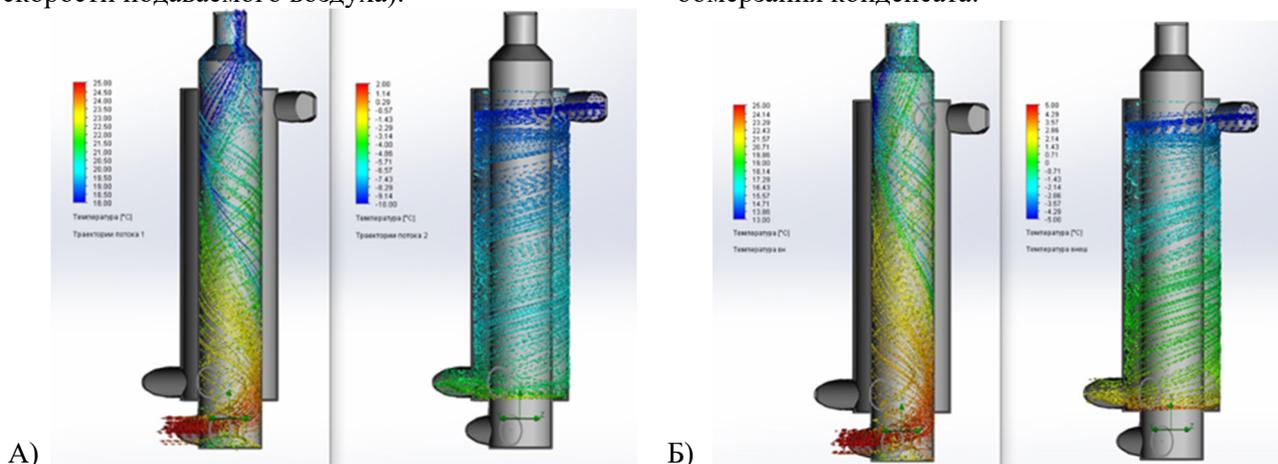


Рис. 4. Визуальное и численное изменение температуры удаляемого и приточного потоков воздуха соответственно. А) при $t_{пр} = -10$ °С и $V_{пр} = 1$ м/с, Б) при $t_{пр} = -5$ °С и $V_{пр} = 1$ м/с.

При температурах наружного воздуха $t_{пр} = -10$ °С и выше обмерзания стенок происходит не будет, так как и минимальное и среднее значения температуры стенок положительны (выше нуля) (рис.4, А-Б). Также было установлено, что при тангенциальном присоединении патрубков обеспечивается воздействие центробежных и инерционных сил, что способствует интенсификации тепло-массообменных процессов, равномерному распределению воздушных

потоков в теплообменном устройстве с образованием на стенках конденсата.

На следующей стадии исследования были проведено моделирование процессов теплопередачи теплообменного устройства при тех же температурах приточного воздуха, равных $-23, -15, -10$ и -5 °С, но при различных скоростях потоков приточного и вытяжного воздуха на входных патрубках теплоутилизатора. Рассмотрены 3 случая:

- скорость на входе в приточном и вытяжном патрубках одинакова и равна 1 м/с;
- скорость на входе в приточном и вытяжном патрубках одинакова и равна 0,5 м/с;
- скорость на входе в приточном патрубке равна 0,67 м/с, а в вытяжном - 1 м/с (для создания отрицательного давления и предотвращения перекрестного загрязнения воздуха).

По результатам моделирования был произведен расчет коэффициента теплоотдачи по формуле (6):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (6)$$

Проведен количественный и визуальный анализ результатов моделирования, на основании которого получена зависимость коэффициента теплопередачи, представленная на рис. 6.

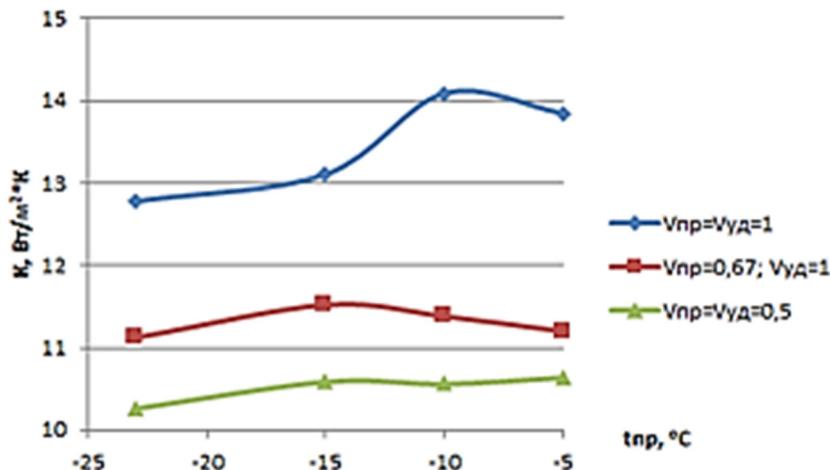


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплопередачи от температуры приточного воздуха и скорости движения воздушных потоков

Как видно из рис. 6, при повышении скорости приточного и вытяжного воздуха на входных патрубках теплообменного устройства с 0,5 м/с до 1 м/с в диапазоне температур -23...-5 °C коэффициент теплопередачи увеличивается на 19–25%.

При повышении температуры приточного воздуха с -23 °C до -5 °C при равных скоростях коэффициент теплопередачи увеличивается на 1–7,5 %, что не оказывает значительного влияния на коэффициент теплопередачи по сравнению с изменением скоростных характеристик воздушных потоков.

Выводы. Для обеспечения равномерного распределения воздушных потоков в теплообменнике, подачу воздуха целесообразно производить через тангенциально установленные входные патрубки как в наружный, так и внутренний трубопроводы. Установлено, что увеличение скорости потоков, либо их турбулизация, приводит к увеличению коэффициента теплопередачи и росту тепловой нагрузки в большей степени, чем изменение температурного напора. Для предотвращения образования наледи на стенках теплообменного устройства температура воздуха, подаваемого в наружный трубопровод должна быть выше -10 °C. Процесс теплообмена происходит наиболее эффективно, когда скорости воздуха на входе в приточном (наружном) и вытяжном (внутреннем) патрубках теплообменника были одинаковыми и составляли 1 м/с, так

как в данном случае достигается наибольшее значение коэффициента теплопередачи. Эффективность изменения коэффициента теплопередачи от гидродинамических условий необходимо использовать при дальнейших исследованиях энергоэффективности рекуператора, и акцентировать внимание на разработку способов турбулизации воздушных потоков.

Источник финансирования. Данная работа была реализована в рамках программы «Приоритет 2030» на базе Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова с использованием оборудования Центра высоких технологий при БГТУ им. В.Г. Шухова.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кордюков М.И., Дешко В.И., Суходуб И.О. Особенности процессов тепломассообмена рекуперативного мембранного теплообменника "воздух-воздух" в летний период // Холодильная техника и технология. 2014. Т. 50, № 1. С. 24–31.
2. Черчаев А.А. Анализ эффективности использования теплообменников-утилизаторов теплоты вытяжного воздуха // Шаг в науку. 2018. № 3. С. 99–102.
3. Rakhimov G. Increasing the efficiency of heat exchange by changing the construction of a shell and tube heat exchanger // Universum: технические науки. 2023. No. 5-8(110). Pp. 21–24.

4. Li Ju., Shan J., Guo Zh., Levstev A. Organization of Pulsating Air Flow Through a Heat Exchanger // Bulletin of Science and Practice. 2021. Vol. 7, No. 1. Pp. 262–269.
5. Wan Sh., Qian Zh., Wu Y., Luo L. Design of Performance Test System for Water-Water and Carbon Dioxide Compressed Air Microchannel Heat Exchanger // Bulletin of Science and Practice. 2023. Vol. 9, No. 6. Pp. 348–362.
6. Щелчков А.В. Физическое и численное моделирование интенсификации теплообмена поверхностными генераторами вихрей в трактах систем охлаждения: специальность 01.04.14 "Теплофизика и теоретическая теплотехника": автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. Казань, 2017. 22 с.
7. Малявина Е.Г., Самарин О.Д. Строительная теплофизика и микроклимат зданий: Рекомендовано Учебно-методическим советом НИУ МГСУ в качестве учебника по направлению подготовки 08.03.01 Строительство, профиль "Теплогасоснабжение, вентиляция, водоснабжение и водоотведение зданий, сооружений и населенных пунктов" (№05 от 06.06.2017 г.). второе издание. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2022. 288 с.
8. Пат. 2799158 С1, Российская Федерация, МПК F24F 7/06. Система вентиляции животноводческих помещений / Т.Н. Ильина, М.С. Колесников, П.А. Орлов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова"; № 2022134301; заявл. 26.12.2022; опубл. 04.07.2023.
9. Il'ina T.N., Evraev D.A., Kolesnikov M.S. Ventilation and heat recovery systems at livestock complexes // Practice Oriented Science: UAE-RUS-SIA-INDIA: Proceedings of the International University Scientific Forum, UAE. Vol. Part 2. UAE: Infinity, 2023. Pp. 72–76.
10. Филиппенко О.А., Ильина Т.Н., Евраев Д.А. Анализ требований к рекуператорам тепла на животноводческих комплексах // Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, учёных и специалистов. Том I. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2022. С. 225–228.
11. Шведов В.В. Системы естественной вентиляции животноводческих помещений // Сер. «Механизация и электрофикация сельского хозяйства». ВАСХНИЛ; ВНИИТЭИ Агротром. М.: 1991г. 44 с
12. Фурсенко С.Н. Организация воздухообмена в помещениях для содержания КРС, свиней и птицы [Электронный ресурс]. URL: https://studref.com/362934/tehnika/organi-zatsiya_vozduhoobmena_pomescheniyah_soderzhaniya_sviney_ptitsy (дата обращения: 11.12.2023)
13. Найденко В.К. Совершенствование технологий на свинофермах и свинокомплексах // Перспективное свиноводство: Теория и практика. 2011. №2. С. 6–15.
14. Колесников М.С., Евраев Д.А. Анализ способов организации приточно-вытяжной вентиляции на свиноводческих комплексах // Молодежь и научно-технический прогресс: Сборник докладов XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Том 1. Губкин: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. С. 480–484.
15. Евраев Д.А., Ильина Т.Н. Анализ энергоэффективности известных видов рекуператоров // Перспективные гуманитарные, социальные и экономические исследования: Сборник статей международной научной конференции, Омск, 25 мая 2023 года. Санкт-Петербург: Общество с ограниченной ответственностью «Международный институт перспективных исследований имени Ломоносова», 2023. С. 46–49.

Информация об авторах

Ильина Татьяна Николаевна, доктор технических наук, профессор кафедры теплогасоснабжения и вентиляции. E-mail: ilina50@rambler.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Уваров Валерий Анатольевич, доктор технических наук, профессор кафедры теплогасоснабжения и вентиляции. E-mail: v_a_uvarov@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Колесников Максим Сергеевич, аспирант кафедры теплогасоснабжения и вентиляции. E-mail: makskol97@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Евраев Дмитрий Андреевич, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: evradima@mail.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Кретьова Виктория Сергеевна, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции. E-mail: vskretova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.12.2023 г.

© Ильина Т.Н., Уваров В.А., Колесников М.С., Евраев Д.А., Кретьова В.С., 2024

**Il'ina T.N., Uvarov. V.A., Kolesnikov M.S., Evraev D.A., Kretova V.S.*

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhova

Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46

**E-mail: ilina50@rambler.ru*

MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN A PIPE-IN-PIPE HEAT EXCHANGER

Abstract. *Recuperators including heat exchangers of various types are considered. The prospects of using pipe-in-pipe heat exchangers for the utilization of thermal emissions containing significant amounts of moisture and gas emissions, for example, ammonia, which is typical for livestock complexes, are shown. When heat carriers come into contact with different temperatures, moisture vapors condense on the walls of the heat exchanger and gaseous ammonia dissolves in it. The removed air is supplied to the inner pipe, condensate in the form of ammonia water is removed at the bottom of the installation, and the cooled and purified air is discharged through the upper branch pipe into the atmosphere. Based on the theory of similarity, a model setup has been developed. With the help of the SolidWorks Flow Simulation software package, the influence of hydrodynamic and thermophysical properties of heat carriers on heat and mass transfer processes was studied. The temperatures of the cold coolant ranged from -5 to -23 °C, (outside air), the temperature of the thermal coolant (exhaust air) is $+25$ °C. It was found that in order to avoid freezing of the inner surface of the heat exchanger, the temperature of the air supplied to the outer pipeline should be above -10 °C. To increase the heat transfer coefficient, it is advisable to supply heat carriers tangentially. At the same time, it is desirable to maintain the same coolant velocities in the supply and exhaust connection pipes of the installation. To increase the energy efficiency of the installation, it is recommended to develop and improve methods for turbulizing coolant flows.*

Keywords: *heat and mass transfer, heat recovery, energy efficiency, recuperator, heat exchanger "pipe in a pipe".*

REFERENCES

1. Kordjukov M.I., Deshko V.I., Suhodub I.O. Features of heat and mass transfer processes of the air-to-air regenerative membrane heat exchanger in the summer period [Osobennosti processov teplomassoobmena rekuperativnogo membrannogo teploobmennika "vozduh-vozduh" v letnij period]. Refrigerating equipment and technology. 2014. Vol. 50, No. 1. Pp. 24–31. (rus)
2. Cherchaev A.A. Analysis of the efficiency of using heat exchangers- heat exchangers of exhaust air [Analiz jeffektivnosti ispol'zovanija teploobmennikov- utilizatorov teploty vytjazhnogo vozduha]. A step into science. 2018. No. 3. Pp. 99–102. (rus)
3. Rakhimov G. Increasing the efficiency of heat exchange by changing the construction of a shell and tube heat exchanger. Universum: Technical science. 2023. No. 5-8(110). Pp. 21–24.
4. Li Ju., Shan J., Guo Zh., Levtshev A. Organization of Pulsating Air Flow Through a Heat Exchanger. Bulletin of Science and Practice. 2021. Vol. 7, No. 1. Pp. 262–269.
5. Wan Sh., Qian Zh., Wu Y., Luo L. Design of Performance Test System for Water-Water and Carbon Dioxide Compressed Air Microchannel Heat Exchanger. Bulletin of Science and Practice. 2023. Vol. 9, No. 6. Pp. 348–362.
6. Shhelchkov A.V. Physical and numerical modeling of heat transfer intensification by surface vortex generators in cooling system paths [Fizicheskoe i chislennoe modelirovanie intensifikacii teploobmena poverhnostnymi generatorami vkhrej v traktah sistem ohlazhdenija]. Abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Kazan. 2017. 22 p. (rus)
7. Maljavina E.G., Samarin O.D. Building thermophysics and microclimate of buildings [Stroitel'naja teplofizika i mikroklimat zdaniy]. second edition. Moscow: National Research Moscow

State University of Civil Engineering, 2022. 288 p. (rus)

8. Il'ina, T.N., Kolesnikov, M.S., Orlov P.A., Evraev D.A., Echina A.O. Ventilation system of livestock premises. Patent RF, no. 2799158 C1, 2023. (rus)

9. Il'ina T.N., Evraev D.A., Kolesnikov M.S. Ventilation and heat recovery systems at livestock complexes. Practice Oriented Science: UAE-RUS-SIA-INDIA: Proceedings of the International University Scientific Forum, UAE. Vol. Part 2. UAE: Infiniti, 2023. Pp. 72–76.

10. Filippenko O.A., Il'ina T.N., Evraev D.A. Ventilation and heat recovery systems at livestock complexes [Analiz trebovanij k rekuperatoram tepla na zhivotnovodcheskih kompleksah]. Energy saving and innovative technologies in the fuel and energy complex: Materials of the National scientific and practical conference of students, postgraduates, scientists and specialists with international participation. Volume I. Tyumen: Tyumen Industrial University, 2022. Pp. 225–228.

11. Shvedov V.V. Systems of natural ventilation of livestock premises [Sistemy estestvennoj ventiljacii zhivotnovodcheskih pomeshhenij]. Ser. «Mechanizacija i jelektrofikacija sel'skogo hozjajstva». VASHNIL; VNIITJeI Agroprom. 1991. 44 p. (rus)

12. Fursenko S.N. Organization of air exchange in premises for keeping cattle, pigs and poultry [Organizaciya vozduhoobmena v pomeshcheniyah dlya

soderzhaniya KRS, svinej i pticy]. URL: https://studref.com/362934/tehnika/organi-zatsiya_vozduhoobmena_pomescheniyah_soderzhaniya_svinej_ptitsy (date of treatment: 25.09.2022) (rus)

13. Najdenko V.K. Improvement of technologies on pig farms and pig complexes [Sovershenstvovanie tekhnologij na svinofermah i svinokompleksah]. Perspective pig breeding: Theory and practice. 2011. No. 2. Pp. 6–15. (rus)

14. Kolesnikov M.S., Evraev D.A. Analysis of methods of organizing supply and exhaust ventilation at pig breeding complexes [Analiz sposobov organizacii pritochno-vytjazhnoj ventiljacii na svinovodcheskih kompleksah]. Youth and scientific and technical progress: Collection of reports of the XIV international scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists. Vol. 1. Gubkin: Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, 2021. Pp. 480–484. (rus)

15. Evraev D.A., Il'ina T.N. Analysis of energy efficiency of known types of recuperators [Analiz jenergojeffektivnosti izvestnyh vidov rekuperatorov]. Perspective humanitarian, social and economic research: Collection of articles of the international scientific conference, Omsk, May 25, 2023. St. Petersburg: Limited Liability Company "Lomonosov International Institute for Advanced Studies", 2023. Pp. 46–49. (rus)

Information about the authors

Il'ina, Tat'yana N. DSc, Professor. E-mail: ilina50@rambler.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Uvarov, Valerij A., DSc, Professor. E-mail: v_a_uvarov@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kolesnikov, Maksim S. Postgraduate student. E-mail: makskol97@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Evraev, Dmitrij A. Postgraduate student. E-mail: evradima@mail.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Kretova, Viktorija S. Master student. E-mail: vskretova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.12.2023

Для цитирования:

Ильина Т.Н., Уваров В.А., Колесников М.С., Евраев Д.А., Кретова В.С. Моделирование процессов тепло-массообмена в рекуператоре типа «труба в трубе» // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. №1. С. 30–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-30-38

For citation:

Il'ina T.N., Uvarov. V.A., Kolesnikov M.S., Evraev D.A., Kretova V.S. Modeling of heat and mass transfer processes in a pipe-in-pipe heat exchanger. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 1. Pp. 30–38. DOI: 10.34031/2071-7318-2023-9-1-30-38