

ПРИМЕНЕНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТАХ СИСТЕМЫ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Н.В. Рыдалина, Б.Г. Аксенов, О.А. Степанов, Е.О. Антонова

Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия

rydalinanv@tyuiu.ru

Резюме: Увеличение интенсивности теплообмена является одной из главных задач при изготовлении современного теплообменного оборудования. Одним из перспективных способов увеличения теплообмена является использование в теплообменных аппаратах пористых металлов. В работе рассматривается конструкция теплообменного аппарата, в котором используется пористый алюминий. Первый теплоноситель – теплая вода, которая течет по трубкам, проходящим сквозь пористый металл. Сквозь поры протекает второй теплоноситель – фреон, который охлаждает воду. Создан стенд, позволяющий изучить такой теплообменник. Проведен цикл испытаний. Применение стандартных методов расчета теплообменных аппаратов в данном случае невозможно, так как неизвестна внутренняя поверхность пор. Была составлена упрощенная математическая модель такого теплообменника, позволяющая получить решение в удобном для инженерных расчетов аналитическом виде. Проведенные на основе этой модели численные расчеты сопоставлялись с экспериментальными данными. Получено совпадение опытных и расчетных значений в пределах погрешности эксперимента. Проведено сравнение интенсивности теплообмена материалов различной пористости. Установлено, что в теплообменнике с пористым металлом интенсивность теплообмена увеличивается с увеличением коэффициента пористости. Результаты проведенных опытов свидетельствуют о целесообразности применения пористых металлов в теплообменном оборудовании. Полученный аналитический метод позволяет проводить расчеты в том случае, когда площадь поверхности теплообмена неизвестна и позволяет одновременно учитывать теплоемкость и теплоту фазового перехода фреона, если таковой имеет место.

Ключевые слова: Интенсивность теплообмена; пористый метал; коэффициент пористости; низкокипящая жидкость; теплообмен.

Для цитирования: Рыдалина Н.В., Аксенов Б.Г., Степанов О.А., Антонова Е.О. Применение пористых материалов в теплообменных аппаратах системы теплоснабжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 3 С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.

APPLICATION OF POROUS MATERIALS IN HEAT EXCHANGERS OF HEAT SUPPLY SYSTEM

NV. Rydalina, BG. Aksenov, OA. Stepanov, EO. Antonova

Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

rydalinanv@tyuiu.ru

Abstract: Heat exchange capacity increase is one of the main concerns in the process of manufacturing modern heat exchange equipment. Constructing heat exchangers with porous metals is an advanced technique of heat exchange increase. A construction of heat exchangers with porous aluminum is described in this paper. The first heat transfer agent (hot water) flows through thin copper tubes installed within the porous aluminum. The second heat transfer agent (freon) flows through the pores of aluminum. Laboratory facility was created to study such a heat exchanger. Series of experiments were carried out. The purpose of the research presented

here is to create a mathematical model of heat exchangers with porous metals, to perform analytical calculation of the heat exchangers and to confirm the results with the experimental data. In this case, one can't use the standard methods of heat exchangers calculation because the pores inner surface area is indeterminate. The developed mathematical model is based on the equation describing the process of cooling the porous plate. A special mathematical technique is used to take into account the effect of tubes with water. The model is approximate but its solution is analytic. It is convenient. One can differentiate it or integrate it, which is very important. Comparison of calculated and experimental data is performed. Divergence of results is within the limits of experimental error. If freon volatilizes inside the heat exchanger, the heat of phase transition has to be taken into account alongside with heat capacity. The structure of the mathematical model makes it possible. The results presented in this paper prove the practicability of using porous materials in heat exchange equipment.

Keywords: Heat exchange rate; porous metal; porosity coefficient; low-boiling liquid; heat exchange.

For citation: Rydalina NV, Aksenov BG, Stepanov OA, Antonova EO. Application of porous materials in heat exchangers of heat supply system. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020;22(3):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-3-3-13.

Введение

Увеличение интенсивности теплообмена является одной из главных задач при изготовлении современного теплообменного оборудования. Одним из перспективных способов увеличения теплообмена является использование в теплообменных аппаратах пористых металлов.

Появление новых пористых теплопроводных материалов, изготовленных из порошковых алюминия, меди и др. материалов, позволяет создавать новые эффективные и компактные теплообменные аппараты. Одним из способов конструирования таких аппаратов является заполнение каналов или межтрубных пространств пористыми металлами различной пористости. Такие теплообменные аппараты могут иметь различное назначение и являться основными элементами холодильных установок, тепловых насосов, конденсаторов паровых турбин. Пористые металлы позволяют значительно увеличить теплоотдачу.

Возможны различные конструктивные решения теплообменных аппаратов с использованием пористых металлов. Известны конструкции пластинчатых теплообменников, в которых межпластинчатые каналы для движения теплоносителей заполнены пористыми металлическими вставками с высокой удельной площадью внутренней поверхности каркаса и малыми значениями эквивалентных диаметров внутренних каналов, обеспечивающих высокую интенсивность теплообмена рабочих сред. Предложенная конструкция значительно увеличивает теплопередачу [1].

Используются пористокомпактные теплообменные аппараты, принцип действия которых основан на интенсификации процессов теплообмена путем введения в каналы трактов пористого наполнителя из материалов с высокой теплопроводностью. В одной из наиболее эффективных конструкций таких теплообменников корпус набран из колец. Между ними вставлены непроницаемые разделительные мембраны. Они образуют проточные щелевые каналы теплообменника. Последние частично или полностью заполнены пористопроницаемыми наполнителями с равномерно расположенными в них дистанционирующими штырями. Для заполнения используется высокопористый материал с изменяемой относительной толщиной пористого материала. Корпус выполнен цилиндрическим круглым или овальным в сечении [2].

Существуют оригинальные конструкции испарительных элементов, которые предназначены для охлаждения тел в различных отраслях техники. Испарительный элемент выполнен в виде примыкающей к теплопередающей поверхности трехслойной стенки с различной пористостью крайних и среднего слоев. Крайние слои изготавливаются из пористого металла со средней пористостью порядка 0,5, а средний слой с низкой пористостью порядка 0,2-0,25 [3].

Кроме того, с целью повышения интенсификации теплообмена и уменьшения габаритов теплообменных аппаратов предлагают использовать интенсификаторы теплообмена и сепараторы жидкой фазы, которые установлены внутри теплообменных труб. Сепараторы расположены на выходе из труб и представляют собой

перфорированную втулку. На внешней поверхности втулки установлены фильтры, выполненные из пористого материала, пористость которого возрастает по длине втулки в направлении выхода труб [4].

Для повышения точности термостабилизации температуры используют специальные теплообменные поверхности. Теплообменная поверхность состоит из ребер, изготовленных из термочувствительного материала, установленных с возможностью изменения угла наклона. Со стороны оребрения лист с капиллярными отверстиями над поверхностью крепления ребер образует полость, которая заполняется капиллярно-пористым материалом [5].

Разнообразие используемых пористых структур и соответствующих теплообменных аппаратов обусловлено разнообразием сфер их применения [6,7]. Большая их часть предназначена для теплоносителей типа «газ-газ» и «газ-вода» с однофазовым теплоносителем [8,9]. Они нашли применение в ракетных двигателях [10], для охлаждения лопаток газовых турбин [11,12], элементов электронной аппаратуры и других теплонапряженных устройств [13-15].

Предлагаются и различные способы теплообмена между двумя теплоносителями. С целью стабилизации температуры одного из теплоносителей предлагается использовать третью среду, которая протекает по каналу стабилизируемого теплоносителя герметичной полости [16-18]. В некоторых конструкциях полость предлагается заполнить пористой структурой [19].

Пористые структуры нашли применение в теплообменных элементах и теплообменных аппаратах с объемным тепловыделением [20]. Существуют различные конструктивные решения теплообменных аппаратов, в которых для повышения теплосъема используется течение теплоносителей с фазовым переходом [21].

Анализ литературных источников и показывает, что ведется активная работа по созданию теплообменных аппаратов с использованием пористых материалов.

В Тюменском индустриальном университете разработана и создана установка для исследования эффективности применения таких материалов.

Объектом исследования является процесс теплообмена в теплообменниках типа «жидкость - газ» с фазовым переходом теплоносителя и без фазового перехода.

Теоретической основой создания теплообменника типа «вода - газ» с фазовым переходом теплоносителя являются исследования Попова И.А и других авторов [22,23].

В данной работе рассматривается конструкция теплообменного аппарата, в котором используется пористый алюминий. Сквозь поры протекает теплоноситель – фреон, второй теплоноситель - охлаждаемая вода течет по трубкам, которые проходят внутри пористого металла.

Теплообменник представляет собой совокупность из 19 медных трубок для течения воды, на которые одеты четыре цилиндрические вставки из пористого алюминия. Всего теплообменников три. В первом теплообменнике пористость вставок 0,4903, во втором теплообменнике пористость вставок 0,4865 и в третьем теплообменнике пористость вставок 0,4739. Внутренняя часть теплообменного аппарата с пористыми вставками представлена на рис. 1.



Рис. 1. Вставки из пористого алюминия

Пористые вставки представляют собой цилиндры из пористого алюминия высотой 50 мм и диаметром 49 мм. Каждая вставка имеет 19 отверстий диаметром по 6 мм, для трубок по которым движется вода. Сквозь поры вставки движется фреон.

Экспериментальная установка состоит из двух контуров. Первый контур с водой, оборудован насосом, котлом для подогрева воды, а так же измерительно-вычислительным комплексом, позволяющий с разрешением по времени 3 с отслеживать изменение температуры воды и следить за массовым расходом. Второй контур – испарительная часть, в которую заливается фреон R404a.

Фреоновый контур (рис.2) оборудован средствами измерения температуры, а также измерения давления фреона на входе и выходе в компрессор.

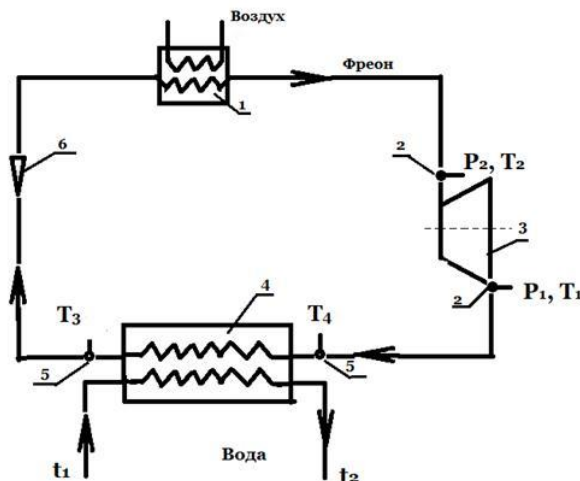


Рис. 2. Принципиальная схема фреоновых контуров установки
1 – конденсатор; 2 – термоманометр; 3 – компрессор; 4 – испаритель;
5 – датчик температуры; 6 – дроссель.

Эксперименты проводились на каждом из трех имеющихся теплообменников при постоянном значении расхода воды. При этом фиксировалась температура воды на входе и выходе в теплообменный аппарат, а также температура фреона на входе и выходе. Расход воды измерялся контрольно-измерительным устройством. С целью уменьшения случайных погрешностей, при каждом изменении расхода, показания изменения температуры снимались по 10 раз. В результате был получен массив данных, позволяющий оценить интенсивность теплообмена. Обработка результатов проведенного цикла испытаний свидетельствует о целесообразности применения пористых металлов в теплообменном оборудовании [24].

Поставлена задача разработать математическую модель, позволяющую определить температуру теплоносителя в любом поперечном сечении теплообменного аппарата. Применение стандартных методов расчета теплообменных аппаратов в данном случае невозможно, так как неизвестна внутренняя поверхность пор. Была составлена упрощенная математическая модель такого теплообменника, позволяющая получить решение в удобном для инженерных расчетов аналитическом виде. Проведенные на основе этой модели численные расчеты сопоставлялись с экспериментальными данными. Получено совпадение опытных и расчетных значений в пределах погрешности эксперимента.

Проведено сравнение интенсивности теплообмена материалов различной пористости. Данный метод позволяет проводить расчеты в том случае, когда площадь поверхности теплообмена неизвестна и позволяет одновременно учитывать теплоемкость и теплоту фазового перехода фреона, если таковой имеет место (например, если в качестве горячего теплоносителя используется антифриз, охлаждаемый до достаточно низких температур).

Методы исследования

Рассматривается пористый цилиндр (пористая вставка), изготовленный из алюминия, с постоянным коэффициентом теплопроводности λ_c . Цилиндр хорошо изолирован, поэтому полагаем, что теплообмен с внешней средой через его поверхность отсутствует. Внутри пористого цилиндра проходит несколько медных трубок, через которые протекает охлаждаемая вода с температурой на входе $t_{вх}$ (рис. 3).

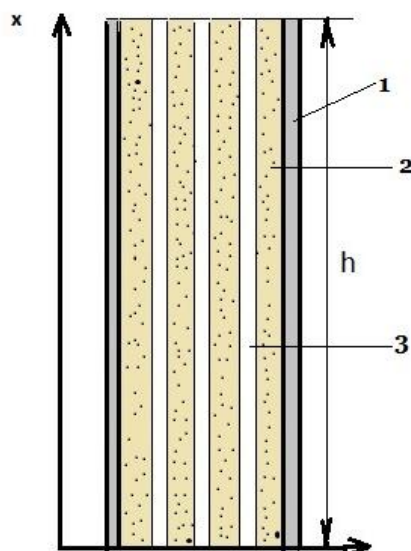


Рис. 3. Пористый цилиндр с трубками:

1 – теплоизоляционный материал; 2 – пористый металл; 3 – трубка медная

Фреон непрерывно подается снизу вверх с постоянным удельным массовым расходом G_c .

Вода из некоторой емкости поступает в трубки сверху вниз (схема противотока) с постоянным удельным массовым расходом G_b , после чего снова возвращается в емкость. Таким образом, процесс носит циклический характер. Время, за которое объем воды, равный внутреннему объему всех трубок, проходит через теплообменник назовем временем цикла $\tau_{ц}$. Расчет проводится для каждого цикла отдельно. За время цикла вода охлаждается и на выходе имеет температуру $t_{вых}$ (находится расчетом). Охлаждается и вода в емкости, так что в следующем цикле значение $t_{вх}$ будет другое. Оно находится также расчетным путем. Далее все многократно повторяется. Поставлена задача, найти зависимость $t_{вых}$ от общего времени работы аппарата и сравнить расчетные данные с экспериментальными.

Площадь внутренней поверхности трубок S известна. Объем пористой вставки V_v известен. Температура фреона на входе и выходе $t(0) = t_{c1}$ и $t(h) = t_{c2}$, а также удельные массовые расходы фреона и воды (G_c и G_b) замеряются в ходе эксперимента.

Заданы теплоемкость фреона и воды – c_{pc} и c_{pb} .

Пористость вставок p рассматривается как отношение объема пор ко всему объему материала. Пористость считается равномерной, следовательно, на единице поверхности, нормальной к направлению потока газа, сечение для прохода газа $f_{ж} = p$, а сечение твердого скелета, участвующего в теплопроводности, равно $f_c = 1 - f_{ж} = 1 - p$. Необходимо отметить также, что если удельный массовый расход фреона равен G_c , то массовый расход внутри пористой вставки будет равен G_c/p .

Плотность теплового потока за счет теплопроводности самой пористой вставки в сечении x и $x+dx$ запишется следующим образом:

$$q_x = -\lambda_c \frac{dt}{dx} (1 - p) \quad (1)$$

и

$$q_{x+dx} = -\lambda_c \frac{d}{dx} \left(t + \frac{dt}{dx} dx \right) (1 - p). \quad (2)$$

В условиях стационарного режима изменение теплового потока на участке dx произойдет вследствие теплообмена между твердым телом и протекающей через поры жидкостью, т.е.

$$dq = q_x - q_{x+dx} = G_c \cdot c_{pc} dt \quad (3)$$

или

$$-\lambda_c \frac{dt}{dx}(1-p) + \lambda_c \frac{dt}{dx}(1-p) + \lambda_c \frac{d^2t}{dx^2}(1-p)dx = G_c \cdot c_{pc} dt. \quad (4)$$

Следовательно, для области $0 \leq x \leq h$ дифференциальное уравнение запишется:

$$\frac{d^2t}{dx^2} - \frac{G_c \cdot c_{pc}}{\lambda_c(1-p)} \frac{dt}{dx} = 0. \quad (5)$$

Таким образом для одномерной задачи охлаждения пористого тела получено уравнение¹:

$$\frac{d^2t}{dx^2} - \xi_c \frac{dt}{dx} = 0 \quad (6)$$

где $\frac{G_c \cdot c_{pc}}{\lambda_c(1-p)} = \xi_c$.

При выводе этого уравнения сделано предположение, что вся передача теплоты внутри пористого тела осуществляется за счет теплопроводности через твердую фазу и что температуры твердого тела и теплоносителя почти не отличаются друг от друга в любой точке пористой структуры. Если принять это предположение, то, уравнение (8) может описывать процесс теплообмена в однородной пористой вставке, то есть без трубок с водой (рис. 3). В этом случае температурное поле можно считать одномерным, учитывая теплоизоляцию.

При наличии трубок с водой температурное поле становится двумерным и уравнение (1) не работает.

Предлагается дополнить это уравнение функцией распределенных источников (стоков) тепла, которая с некоторой погрешностью описывает процесс передачи тепла от пористого материала через стенки медных трубок к воде.

$$q = \frac{\alpha \cdot (t_b - t) \cdot S}{\lambda_b \cdot V_b}. \quad (7)$$

В результате получается уравнение:

$$\frac{d^2t}{dx^2} - \xi_c \frac{dt}{dx} + \frac{\alpha \cdot (t_b - t) \cdot S}{\lambda_b \cdot V_b} = 0 \quad (8)$$

где V_b – объем пористых вставок, α – коэффициент теплоотдачи от медной стенки к воде, t_b – температура воды при данном значении x .

Условия однозначности:

$$0 \leq x \leq h, t(0) = t_{c1}, t(h) = t_{c2} \quad (9)$$

При выводе уравнения (2) пренебрегли тепловым сопротивлением медных стенок.

Решение существенно упрощается, если предположить, что $t_b - t = \text{const}$. Это предположение вполне допустимо при малой высоте вставки h и при использовании схемы противотока. Величину α находим по уравнениям конвективного теплообмена в трубах.

Обозначим $\frac{\alpha \cdot (t_b - t) \cdot S}{\lambda_b \cdot V_b} = A$.

Уравнение (8) примет вид:

¹ Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. Учебник для вузов, изд. 3-е, перераб. и доп. - М.: «Энергия», 1975. - 488 с..

$$\frac{d^2t}{dx^2} - \xi_c \frac{dt}{dx} + A = 0. \quad (10)$$

Краевая задача (8-9) решена стандартными методами и получена функция изменения температуры пористого металла теплообменника вдоль оси x :

$$t = t_{c1} + \frac{A}{\xi_c} x + \left(e^{\xi_c x} - 1 \right) \cdot \frac{t_{c2} - t_{c1} - \frac{A}{\xi_c} h}{e^{\xi_c h} - 1}. \quad (11)$$

Продифференцируем полученную функцию температуры по переменной x :

$$\frac{dt}{dx} = \frac{A}{\xi_c} x + \frac{(t_{c2} - t_{c1}) \cdot \xi_c - A \cdot h}{e^{\xi_c h} - 1} \cdot e^{\xi_c x}. \quad (12)$$

Зная функцию (12), получаем формулу для плотности теплового потока:

$$q = -\lambda_c \cdot (1 - p) \cdot \left(\frac{A}{\xi_c} x + \frac{(t_{c2} - t_{c1}) \cdot \xi_c - A \cdot h}{e^{\xi_c h} - 1} \cdot e^{\xi_c x} \right). \quad (13)$$

Величина $Q(h) - Q(0)$, где Q – количество тепла, при отсутствии теплопотерь равна теплоте, передающейся от воды фреону. Вода в некоторой емкости, имеющая объем V_p циклически прокачивается через трубки теплообменника. Объем воды, находящейся в трубках равен V_t . Это внутренний объем трубок. Теплоемкость и плотность воды соответственно c_{pw} и ρ_w . Начальная температура воды равна $t_{нач}$. Пусть $t_{вх1}$, $t_{вых1}$ – соответственно температура воды на входе и на выходе в первом цикле.

$$t_{вх1} = t_{нач}.$$

При известном ΔQ получаем:

$$t_{вых1} = t_{нач} - \Delta t_t, \quad \Delta t_t = \frac{\Delta Q}{c_{pw} \cdot V_t \cdot \rho_w} \quad (14)$$

Вода с температурой $t_{вых1}$ поступает обратно в некоторую емкость. Температура в емкости уменьшается на величину:

$$\Delta t_p = \frac{\Delta Q}{c_{pw} \cdot V_p \cdot \rho_w}$$

Вода с такой температурой поступает в теплообменник во втором цикле, то есть:

$$t_{вх2} = t_{нач} - \Delta t_p, \quad (15)$$

По формулам, аналогичным (14), находим $t_{вых2}$ и $t_{вх3}$ и так далее.

Результаты и обсуждения

Наиболее эффективным оказывается проведение экспериментов параллельно с расчетами по описанной методике. Дело в том, что в эксперименте вода прокачивается непрерывно, разделение времени работы на циклы условно введено в математической модели. С введением этого понятия появляется возможность определить количество теплоты, которую теряет протекающая вода за цикл и на основе этого получить зависимость температуры от времени для заданной массы воды, которая прокачивается через теплообменный аппарат.

В результате проведенных опытов был получен ряд данных, позволяющих проанализировать степень охлаждения воды за разные периоды времени с использованием материала с разным коэффициентом пористости.

На рис. 4 представлены результаты экспериментов, которые практически совпадают с результатами расчета по формулам (2)-(5). Такая высокая точность расчетов частично объясняется тем, что краевые условия взяты из тех же экспериментов. Если

краевые условия назначать до экспериментов, из общих соображений, то погрешность будет больше. Эксперименты проводились при следующих значениях основных параметров: диаметр пористого образца – $d=0,049\text{м}$; общая длина пористой вставки – $h=0,2\text{м}$; число трубок – $n=19$; внутренний диаметр трубок – $d=0,004\text{ м}$; теплоемкость воды – $C_p=4187\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$; коэффициент теплопроводности алюминия – $\lambda_c=209,3\text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

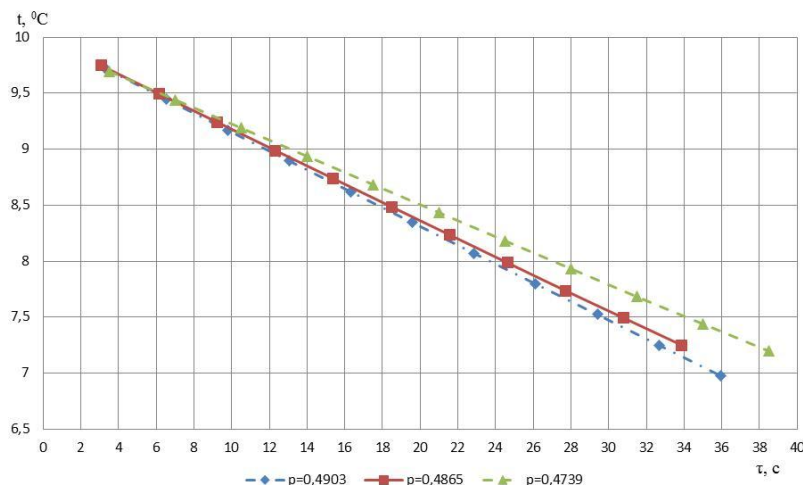


Рис. 4. Изменение степени охлаждения теплоносителя на выходе из теплообменника с течением времени

На графике видно, что в данном диапазоне измерения пористости наиболее интенсивное охлаждение воды происходит в теплообменнике со вставками из пористого металла, имеющего наибольший коэффициент пористости p .

Из физических соображений ясно, что коэффициент пористости должен быть больше некоторого наименьшего значения, при котором обеспечивается проницаемость вставки. С ростом коэффициента пористости p увеличивается внутренняя поверхность пор и интенсивность теплообмена. После некоторого максимального значения внутренняя поверхность начинает уменьшаться. Кроме того, увеличение p ограничено соображениями прочности вставки.

Для получения обоснованной зависимости интенсивности теплообмена от пористости планируется провести экспериментальное исследование в более широком диапазоне изменения величины p .

Выводы

На основании проведенных исследований и расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Полученное уравнение, позволяет определить изменение температуры пористого материала, а затем горячего теплоносителя, в любом сечении теплообменника.
2. В теплообменнике с пористым металлом интенсивность теплообмена увеличивается с увеличением коэффициента пористости.
3. На основе лабораторной установки появляется возможность создания теплообменного аппарата, который можно применять в системах теплоснабжения.

Литература

1. Кирсанов Ю. А. Пластинчатый теплообменник. Патент РФ. №2478891. 10.04.2013. Бюл. №10. Доступно по: <https://patentdb.ru/patent/2478891.html>. Ссылка активна на 20 августа 2019.
2. Горда В.П., Кострубов С.В. Пористо-компактный теплообменник. Патент РФ на изобретение №2001374. 15.10.1993. Бюл. №37-38. Доступно по: <https://patentdb.ru/patent/2001374.html>. Ссылка активна на 13 августа 2019.
3. Сургучев О. В., Несынов В. И., Куликов Ю. Б., и др. Испарительный элемент. Патент СССР. №494585. 5.12.1975. Бюл. №45. Доступно по: <http://patents.su/2-494585-isparitelnyjj-ehlement.html>. Ссылка активна на 20 августа 2019.
4. Шукин В. К., Гортышов Ю. Ф., Дресвянников Ф. Н., и др. Теплообменник. Авторское свидетельство СССР. №1460575. 23.02.1989. Бюл. №7. Доступно по: <http://patents.su/4-1460575-teploobmennik.html>. Ссылка активна на 20 августа 2019.

5. Кирпач Н.С. Теплообменная поверхность. Авторское свидетельство СССР. №1469288. 30.03.1989. Бюл. №12. Доступно по: <http://patents.su/2-1469288-teploobmennaya-poverkhnost.html>. Ссылка активна на 20 августа 2019.
6. Ильющенко А.Ф., Черняк И.Н., Кусин Р.А. и др. Процесс получения пористых проницаемых материалов спеканием электрическим током металлических порошков, волокон и сеток // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т.6 №2. С. 191-196.
7. Хохлов М.А., Ищенко Д.А. Конструкционные сверхлегкие пористые металлы // *Автоматическая сварка*. 2015. №3-4. С. 60-65.
8. Ишкова З.А., Колунин В.С. Влияние типа и толщины пористых материалов на результаты измерения максимального размера сквозных пор // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2019. Т.5. № 1. С. 87-96.
9. Рыдалина Н.В. Экспериментальное исследование возможности увеличения плотности теплового потока // *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе. Материалы Национальной с международным участием научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых учёных и специалистов*. 2018. С. 125-128.
10. Пелевин Ф.В., Пономарев А.В., Семенов П.Ю. Рекуперативный теплообменный аппарат с пористым металлом для жидкостного ракетного двигателя // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. 2015. №6. С. 74-81.
11. Трушляков В.И., Куденцов В.Ю., Лесняк И.Ю. и др. Экспериментальные исследования процессов тепло- и массообмена при испарении жидкостей // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. Т. 1. №2. С. 10-17.
12. Губкин А. С. Численный расчет проницаемости в двумерной пористой среде со скелетом из случайно расположенных пересекающихся дисков / А. С. Губкин, Д. Е. Игошин, Д. В. Трапезников // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2016. Т. 2. № 4. С. 54-68.
13. Hamadouche, A., Azzi, A., Abboudi, S., et al. Enhancement of heat exchanger thermal hydraulic performance using aluminum foam // *Experimental Thermal and Fluid Science* 2018, 92l pp. 1-12.
14. Soleimanikutanaei S., Lin C.-X., Wang D. Modeling and simulation of cross-flow transport membrane condenser heat exchangers // *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2018, 95 pp. 92-97
15. Родионов С. П. Моделирование процесса двухфазной фильтрации с учетом воздействия периодической нагрузки / С. П. Родионов, А. Ю. Боталов, Д. Ю. Легостаев // *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2016. Т. 2. № 2. С. 73–83.
16. Buonomo B., Di Pasqua A., Ercole D., et al. Numerical investigation on a Heat Exchanger in Aluminum Foam // *Energy Procedia*. 2018; 148 pp. 782-789.
17. Осипов С.Н., Захаренко А.В. Энергоэффективные малогабаритные теплообменники из пористых теплопроводных материалов // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2018. Т. 61, № 4 С. 346-358.
18. Курпатенков А.В., Поляев В.И., Синцов А.Л. Способ теплообмена между двумя теплоносителями. Авторское свидетельство СССР. №1423905. 15.09.1988. Бюл. №34. Доступно по: <https://patentdb.ru/patent/1423905.html>. Ссылка активна на 20 августа 2019.
19. Синцов А.Л., Поляев В.М., Курпатенков А.В. Теплообменное устройство с регулируемым теплосъемом. Авторское свидетельство СССР. №1223009. 07.04.1986. Бюл. №13. Доступно по: <https://patentdb.ru/patent/1223009.html>. Ссылка активна на 20 августа 2019.
20. Bartis A. Resistance type fluid heating apparatus. Patent US. №3833791. 09.03.1974. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/3833791.html> html. Accessed to: 20 avg 2019.
21. John L., James F., Richard P. Porous plate condenser. Patent US. №3394756. 05.01.1976. Available at: <http://www.freepatentsonline.com/3394756.pdf> html. Accessed to: 20 avg 2019.
22. Попов И.А. Гидродинамика и теплообмен в пористых теплообменных элементах и аппаратах. Интенсификация теплообмена: монография. Казань: Центр инновационных технологий, 2007. 240 с.
23. Гортышов Ю.Ф. и др. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. Казань: Центр инновационных технологий, 2009. 531 с.
24. Davletbaev V., Rydalina N., Antonova E. Experimental investigation of the heat exchange intensity // *MATEC Web of Conferences* 245. SPb.: 2018, 07002.

Авторы публикации

Рыдалина Наталья Владимировна – аспирант, Тюменский индустриальный университет.

Аксенов Борис Гаврилович – д-р физ.-мат. наук, профессор, консультант кафедры Промышленная теплоэнергетика, Тюменский индустриальный университет.

Степанов Олег Андреевич – д-р техн. наук., профессор, заведующий кафедры Промышленная теплоэнергетика, Тюменский индустриальный университет.

Антонова Елена Олеговна – канд. техн. наук, доцент кафедры Промышленная теплоэнергетика, Тюменский индустриальный университет.

References

1. Kirsanov YA. *Plastinchatyy teploobmennik*. Patent RUS. №2478891. 10.04.2013. Byul. №10. Available at: <https://patentdb.ru/patent/2478891.html>. Accessed: 20 avgusta 2019.
2. Gorda VP, Kostrubov SV. *Poristo-kompaktnyy teploobmennik*. Patent RUS. №2001374. 15.10.1993. Byul. №37-38. <https://patentdb.ru/patent/2001374.html>. Accessed: 13 Avg 2019.
3. Surguchev OV, Nesynov VI, Kulikov YuB, et al. *Isparitелный элемент*. Patent SSSR. №494585. 5.12.75. Byul. №45. Available at: <http://patents.su/2-494585-isparitelnyjj-ehlement.html> html. Accessed: 20 avgusta 2019.
4. Shchukin VK, Gortyshov YuF., Dresvyannikov FN. et al. *Teploobmennik*. Avtorskoye svidetelstvo SSSR. №1460575. 23.02.89. Byul. №7. Available at: <http://patents.su/4-1460575-teploobmennik.html> html. Accessed: 20 avgusta 2019.
5. Kirpach NS. *Teploobmennaya poverkhnost*. Avtorskoye svidetelstvo SSSR. №1469288. 30.03.89. Byul. №12. Available at: <http://patents.su/2-1469288-teploobmennaya-poverkhnost.html> html. Accessed: 20 avgusta 2019.
6. Pelevin FV, Ponomarev AV, Semenov PY. Recuperative heat exchanger with porous metal for liquid rocket engine. Proceedings of higher educational institutions. *Engineering*. 2015;6: 74-81.
7. Ilyushchenko AF, Chernyak IN, Kusun RA et al. The process of obtaining porous permeable materials by electric current sintering of metal powders, fibers and grids. *Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2018;6(2):191-196.
8. Khokhlov MA, Ishchenko DA. Structural ultralight porous metals. *Automatic welding*. 2015; 3-4: 60-65.
9. Ishkova ZA, Kolunin VS. Vliyanie tipa i tolshchiny poristyh materialov na rezul'taty izmereniya maksimal'nogo razmera skvoznykh por. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*. 2019; 5(1):87-96.
10. Rydalina NV. Experimental study of the possibility of increasing the heat flux density. *Energy Saving and innovative technologies in the fuel and energy complex*. Materials of the National conference with international participation of students, postgraduates, young scientists and specialists. 2018;125-128.
11. Trushlyakov VI, Kudencov VYU, Lesnyak IYU, et al. Eksperimental'nye issledovaniya processov teplo- i massoobmena pri isparenii zhidkostej. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin*. 2016; 1(2):10-17.
12. Gubkin AS, Igoshin DE, Trapeznikov DV. Chislennyj raschet pronicaemosti v dvumernoj poristoj srede so skeletom iz sluchajno raspolzhenykh peresekeyushchihsya diskov. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*. 2016;2(4): 54-68.
13. Hamadouche A, Azzi A, Abboudi S, et al. Enhancement of heat exchanger thermal hydraulic performance using aluminum foam. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018;92l: 1-12.
14. Soleimanikutanaei S, Lin C-X, Wang D. Modeling and simulation of cross-flow transport membrane condenser heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2018; 95:92-97.
15. Rodionov SP, Botalov YU, Legostaev DYU. Modelirovanie processa dvuhfaznoj fil'tracii s uchetom vozdejstviya periodicheskoy nagruzki. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft', gaz, energetika*. 2016;2(2):73-83.
16. Buonomo B, Di Pasqua A, Ercole D, et al. Numerical investigation on a Heat Exchanger in Aluminum Foam. *Energy Procedia*. 2018;148:782-789.
17. Osipov SN, Zakharenko AV. Energy-Efficient small-size heat exchangers made of porous heat-conducting materials. *Energetika. WPI. higher. studies'. institutions and energy. associations of the CIS*. 2018;61(4):346-358.
18. Kurpatenkov AV, Polyayev VI, Sintsov AL. *Sposob teploobmena mezhdu dvumya*

teplonositelyami. Avtorskoye svidetelstvo SSSR. №1423905. 15.09.88. Byul. №34. Available at: <https://patentdb.ru/patent/1423905.html>. Accessed: 20 avgusta 2019.

19. Sintsov AL, Polyayev VM, Kurpatenkov AV. *Teploobmennoye ustroystvo s reguliruyemym teplosyemom*. Avtorskoye svidetelstvo SSSR. №1223009. 07.04.86. Byul. №13. Available at: <https://patentdb.ru/patent/1223009.html>. Accessed: 20 avgusta 2019.

20. Bartis A. *Resistance type fluid heating apparatus*. Patent US. №3833791. 09.03.1974. Available at: <http://www.freepatentonline.com/3833791.html>. Accessed: 20 avg 2019.

21. John L, James F, Richard P. *Porous plate condenser*. №3394756. 05.01.1976. Available at: <http://www.freepatentonline.com/3394756.pdf>. Accessed: 20 avg 2019.

22. Popov IA. *Hydrodynamics and heat exchange in porous heat exchange elements and apparatus. Intensification of heat transfer*. Kazan: Center of innovative technologies, 2007; 240 p.

23. Gortyshov YF. and others. *Thermal-Hydraulic efficiency of perspective methods of heat transfer intensification in heat exchange equipment channels*. Kazan: Center of innovative technologies, 2009. 531 p.

24. Davletbaev V, Rydalina N, Antonova E. *Experimental investigation of the heat exchange intensity*. MATEC Web of Conferences 245. SPb.:2018;07002.

Authors of the publication

Natalia V. Rydalina – Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia. Email: rydalinanv@tyuiu.ru.

Boris G. Aksenov – Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.

Oleg A. Stepanov – Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.

Elena O. Antonova – Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia.

Поступила в редакцию

28 августа 2019г.