

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛООБМЕНА В АППАРАТЕ ЗЕРНИСТОГО ТИПА В СЛУЧАЕ СВОБОДНОГО ПОРОВОГО ПРОСТРАНСТВА

Дарья Владимировна Савич¹, Нелли Вадимовна Колосова², Злата Викторовна Удовиченко³

^{1,2,3} Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ДНР, Макеевка, Россия, ¹ d.v.savich@donnasa.ru, ² n.v.kolosova@donnasa.ru, ³ z.v.udovichenko@donnasa.ru

Аннотация. В статье рассмотрены процессы теплопередачи от первичного к вторичному контуру зернистого газоочистного аппарата теплоутилизатора. Подробно проанализированы процессы передачи теплоты от горячего газа воде через стенку трубки с помощью теплопроводности и вынужденной конвекции. Показано возможное изменение температуры воды на входе и выходе зернистого слоя за счет передачи теплоты от горячего контура холодному. Представлена конструкция аппарата с зернистым слое для одновременной очистки и утилизации теплоты отходящих газов промышленного оборудования за счет включения в зернистый слой конвективных трубок. Рассмотрены основные определяющие величины зернистого наполнителя, в качестве которого была принята шамотная крошка; газового потока, воды, конвективных трубок. Даны основные выводы по теме исследования.

Ключевые слова: теплообмен, теплопередача, кондуктивный, конвективный, зернистый слой, теплоутилизатор, первичный теплоноситель, вторичный теплоноситель

Для цитирования: Савич Д. В., Колосова Н. В., Удовиченко З. В. Процессы теплообмена в аппарате зернистого типа в случае свободного порового пространства // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2024. Выпуск 2024-5(169) Инженерные системы и техногенная безопасность. С. 31–40. doi: 10.71536/vd.2024.5c169.4. edn: mjinxu.

Original article

HEAT EXCHANGE PROCESSES IN A GRANULAR-TYPE APPARATUS IN THE CASE OF FREE PORE SPACE

Darya V. Savich¹, Nelly V. Kolosova², Zlata V. Udovichenko³

^{1,2,3} Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka, Russia, ¹ d.v.savich@donnasa.ru, ² n.v.kolosova@donnasa.ru, ³ z.v.udovichenko@donnasa.ru

Abstract. The article considers heat transfer processes from the primary to the secondary circuit of a granular gas cleaning apparatus of a heat recovery unit. The processes of heat transfer from hot gas to water through the tube wall using thermal conductivity and forced convection are analyzed in detail. A possible change in water temperature at the inlet and outlet of the granular layer due to heat transfer from the hot circuit to the cold one is shown. The design of an apparatus with a granular layer for simultaneous cleaning and utilization of heat from industrial equipment exhaust gases is presented due to the inclusion of convective tubes in the granular layer. The main determining values of the granular filler, which was taken as fireclay crumbs, gas flow, water, convective tubes are considered. The main conclusions on the topic of the study are given.

Keywords: heat exchange, heat transfer, conductive, convective, granular layer, heat recovery unit, primary heat carrier, secondary heat carrier



For citation: Savich D. V., Kolosova N. V., Udovichenko Z. V. Heat exchange processes in a granular-type apparatus in the case of free pore space. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Engineering systems and technological safety*. 2024;5(169):31–40. (In Russ.). doi: 10.71536/vd.2024.5c169.4. edn: mjinxy.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

В России проблеме очистки отходящих газов производственного оборудования и совершенствованию ее технологий уделяется серьезное внимание [1, 2]. Наряду с активным использованием для очистки запыленных газов аппаратов с зернистым материалом, актуальной становится вопрос модернизация конструкций газоочистных аппаратов зернистого типа для одновременной утилизации низкопотенциальной теплоты [3, 4]. Нами предложена конструкция зернистого газоочистного-теплоутилизатора с включением в слой зернистого материала из шамотной крошки конвективных трубок. Для определения эффективности предложенной конструкции в статье представлена модель для определения количества теплоты передаваемой от горячего контура, в качестве которого выступает газ, холодному контуру – холодной воде, движущейся по конвективным трубкам, расположенным в слое зернистого материала промежуточного теплоносителя.

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Вопрос очистки запыленных газов от технологического оборудования в аппаратах зернистого типа был подробно изучен в работах таких авторов как И. А. Чугунова, С. Ю. Кабанов, Р. Р. Шарипов [5–7]; в свою очередь, в трудах З. В. Удовиченко, С. А. Григорьева и полезной модели Т. В. Шукиной рассмотрены схемы и конструкции аппаратов зернистого типа с возможностью одновременной очистки и утилизации теплоты отходящих запыленных газов за счет внедрения в конструкцию конвективных поверхностей теплообмена [8, 9, 10]. Несмотря на достаточное внимание к данному направлению, остается открытым вопрос подробного изучения процессов теплопередачи в зернистом слое от горячего газового потока вторичному теплоносителю через поверхность конвективных трубок.

ЦЕЛИ

Разработать математическую модель процесса передачи теплоты от горячего газового потока вторичному холодному теплоносителю в газоочистном теплоутилизаторе зернистого типа.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Рассмотрим процесс передачи теплоты в тот период работы газоочистного аппарата, когда поровое пространство в нем остается свободным от пыли каолиновой глины при осаждении её в поровых каналах между зёрнами в процессе её улавливания.

Передача теплоты осуществляется теплопроводностью между поверхностью зерна и стенкой трубы, а также вынужденной конвекцией от газа к поверхности стенки [11, 12]. Схематические изображения процесса передачи теплоты и сечения аппарата в слое зернистого материала приведены, соответственно, на рисунках 1 и 2, где на рисунке 1, q_l – линейный тепловой поток, Вт/м, передаваемый с помощью кондукции; $q_{(в.к.)}$ – линейный тепловой поток, передаваемый с помощью вынужденной конвекции, Вт/м.

Количество теплоты, передаваемое от горячего к холодному контуру, можно записать с помощью выражения

$$Q_l = F_{\text{тепл}} \cdot q_l + F_{\text{в.к.}} \cdot q_{\text{в.к.}}, \quad (1)$$

где q_l – линейный тепловой поток, Вт/м, передаваемый с помощью кондукции, зависящий, в свою очередь, от диаметра и материала зерен

$$q_l = f(d_3, \lambda_3); \quad (2)$$

d_3 – диаметр зерен промежуточного теплоносителя, м;

λ_3 – коэффициент теплопроводности зернистого материала, Вт/м·град;

$q_{(в.к.)}$ – линейный тепловой поток, передаваемый с помощью вынужденной конвекции, Вт/м, который, в свою очередь, зависит от температуры и скорости газа

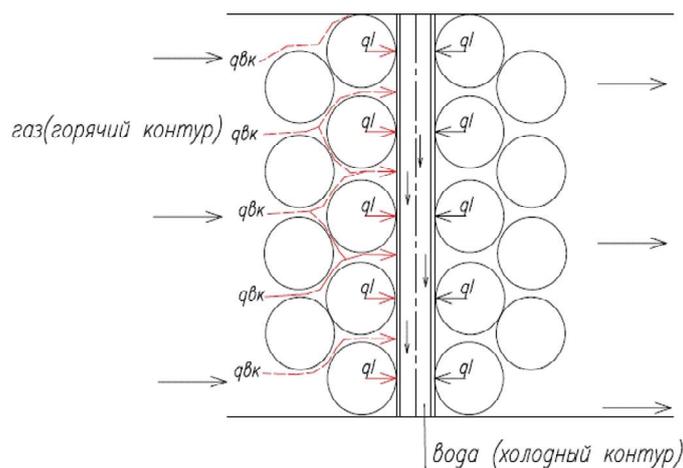


Рисунок 1 – Схема конвективно-кондуктивной передачи теплоты от газового потока трубкам в зернистом промежуточном теплоносителе.

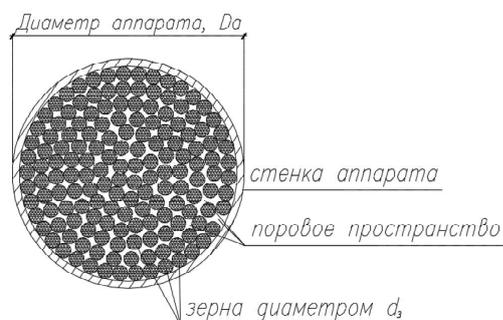


Рисунок 2 – Схематическое изображение сечения аппарата в слое зернистого материала.

$$q_{в.к.} = f(t_r, v_r); \quad (3)$$

$F_{\text{тепл}}$ – площадь поверхности трубок, где передача теплоты осуществляется теплопроводностью, м^2 ;

$F_{\text{(в.к.)}}$ – площадь поверхности трубок, где передача теплоты осуществляется вынужденной конвекцией, м^2 ;

t_r – температура газового потока, $^{\circ}\text{C}$;

v_r – скорость газового потока, м/с .

Таким образом, предположим, что общая площадь поверхности трубок с холодным контуром может быть представлена с помощью выражения

$$F_{\text{тр}} = A \cdot F_{\text{тепл}} + B \cdot F_{\text{(в.к.)}}, \quad (4)$$

где A – доля от всей площади трубы, где передача теплоты осуществляется теплопроводностью, непосредственно при контакте с зернами;

B – доля от всей площади трубы, где передача теплоты осуществляется вынужденной конвекцией.

Опираясь на законы теплообмена [13, 14], температура горячего контура t_r (отходящих газов) при прохождении зернистого слоя, в которых расположены трубы с холодным контуром, будет снижаться, а температура воды в трубках будет увеличиваться.

Схематически изменение температуры в слое зернистого материала, в котором расположены трубы с холодным теплоносителем, представлено на рисунке 3.

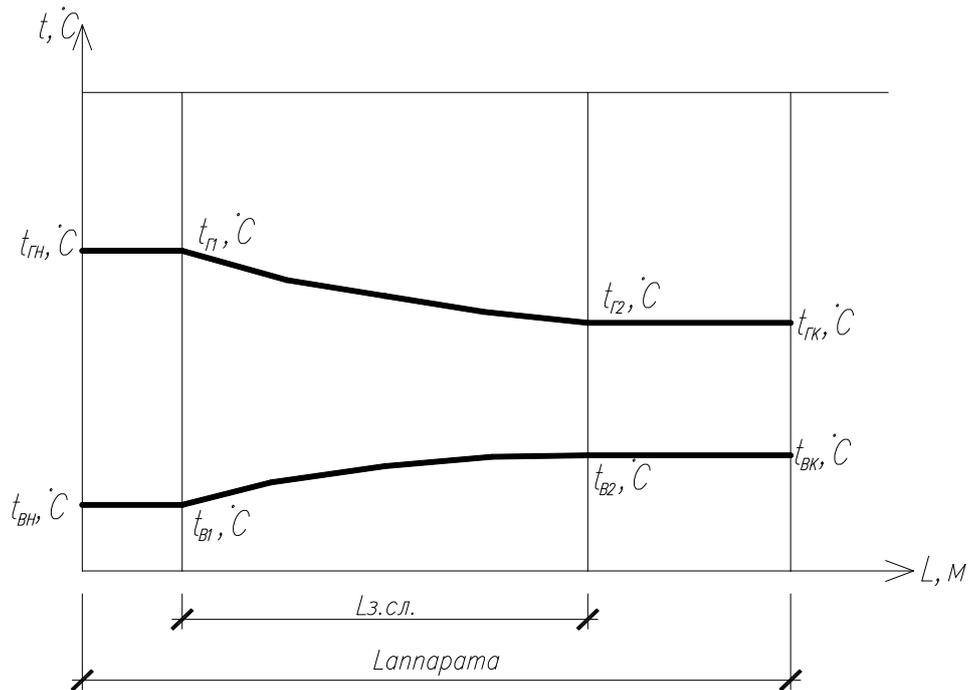


Рисунок 3 – Изменение температуры в зернистом пространстве.

На графике изменения температуры в зернистом слое (рисунок 3) $t_{ГН}$, $t_{Г1}$, $t_{Г2}$, $t_{ГК}$ – температура газа (горячего контура) на входе в аппарат, в начале и конце слоя зернистого наполнителя и на выходе из зернистого теплоутилизатора соответственно, °C;

$t_{ВН}$, $t_{В1}$, $t_{В2}$, $t_{ВК}$ – температура воды в трубках (холодного контура) на входе в аппарат, в начале и конце слоя зернистого наполнителя и на выходе из зернистого теплоутилизатора соответственно, °C;

$L_{аппарата}$, $L_{з.сл.}$ – длина теплоутилизатора и высота слоя зернистой засыпки, соответственно.

Рассмотренные процессы в дальнейшем позволят математически описать модель передачи теплоты воде холодного контура от запыленных газов горячего контура через зернистый наполнитель.

Передача теплоты вынужденной конвекцией от газа к воде через цилиндрическую стенку определяем из уравнения теплопередачи

$$q_{в.к.} = K \cdot (t_{г} - t_{в}), \quad (5)$$

где K – коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, Вт/м²·град, определяется из выражения

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{г} \cdot d_{нар}} + \frac{\ln \delta_{тр}}{2\lambda_{тр}} + \frac{1}{\alpha_{в} \cdot d_{вн}}}, \quad (6)$$

где $\alpha_{г}$, $\alpha_{в}$ – коэффициент теплоотдачи, соответственно, в газовой среде и воде, Вт/м.град;

$t_{г}$, $t_{в}$ – температуры, соответственно, газа и воды, °C;

$d_{тр}$ – толщина стенки трубы, м;

$\lambda_{тр}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубы, Вт/м.град;

$\frac{\delta_{тр}}{\lambda_{тр}}$ – термическое сопротивление слоя, (м²·град)/Вт;

$d_{нар}$, $d_{вн}$ – наружный и внутренний диаметры трубки, м.

Коэффициент теплоотдачи в газовой среде при прохождении через зернистый слой определяет из выражения

$$\alpha_{г} = \frac{Nu \cdot \lambda_{г}}{d_{э}}, \quad (7)$$

где $\lambda_{г}$ – коэффициент теплопроводности продуктов сгорания природного газа, Вт/м.град.

Рассматривая течение в слое как внутреннюю задачу, введем в расчет параметр эквивалентного диаметра порового канала зернистого наполнителя d_3 .

От технологического оборудования газовый поток движется через зернистый промежуточный наполнитель по каналам пустот слоя различной сложной формы.

Эквивалентный диаметр порового пространства можно выразить через отношение величины порозности слоя из зерен шамотной крошки ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$, к удельной поверхности частиц насыпного материала a , $\text{м}^2/\text{м}^3$

$$d_3 = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a_0 \cdot (1 - \varepsilon)} = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a}, \quad (8)$$

где a_0 – удельная поверхность зерен, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

a – поверхность зерен слоя, которая приходится на единицу его объема, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

ε – экспериментальное определение пористости зернистого слоя, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Свободная поверхность слоя, омываемая потоком газа будет определяться:

$$a = a_0 (1 - \varepsilon) \cdot K_{\text{н}}, \quad (9)$$

где $K_{\text{н}}$ – коэффициент экранировки зерен, который учитывает уменьшение удельной поверхности зерен при их соприкосновении, $K_{\text{н}} < 1$.

Исходя из формулы 9, для стационарного зернистого слоя поверхность зерен слоя, которая приходится на единицу его объема, показатель a , объединяет в себе обе величины – удельную поверхность зерен a_0 , $\text{м}^2/\text{м}^3$, и пористость зернистого слоя ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$, что, в свою очередь, характеризует ее как определяющий размер неподвижного насыпного материала [15–16].

Удельная поверхность одиночного шара определяется из выражения

$$a_0 = \frac{\pi \cdot d^2}{\frac{1}{6} \cdot \pi \cdot d^3} = \frac{6}{d}. \quad (10)$$

где d – диаметр частицы зернистого элемента, м.

Для элементов слоя неправильной формы, которые могут иметь углы, выступы и впадины, a_0 можно определить как соотношение поверхности A_3 зерна к его объему V_3 .

$$a_0 = A_3 / V_3. \quad (11)$$

где A_3 – поверхность зерна, м^2 ;

V_3 – объем зерен, м^3 .

Шамотная крошка является полидисперсным зернистым материалом с пористостью ε .

Пористость зернистого слоя ε определялась опытным путем [15, 16]. Для этого была измерена плотность материала зерна ρ_3 , в качестве которого выступала шамотная крошка различного диаметра, и насыпная плотность слоя $\rho_{\text{н}}$.

Насыпную плотность зернистого материала из шамотной крошки можно определить по формуле

$$\rho_{\text{н}} = (1 - \varepsilon) \cdot \rho_3. \quad (12)$$

Из уравнения (12) можно определить выражение для определения величины пористости насыпного зернистого материала

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_3}, \quad (13)$$

где $\rho_{\text{н}}$, ρ_3 – насыпная плотность материала слоя и плотность зерна, соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В том случае, когда материал зерен имеет внутреннюю пористость, под величиной ρ_3 подразумевают кажущуюся плотность материала зерна шамотной крошки, которую можно определить из отношения веса зерна M , кг, к его объему V , м^3 , из выражения

$$\rho_{\text{н}} = \frac{M}{V}, \quad (14)$$

где M – вес зерна, кг;
 V – объем зерна, м³.

Опытным путем было установлено, что зерна шамотной крошки имеют внутреннюю пористость $\varepsilon_{\text{внут}}$, следовательно плотность зерна может быть рассчитана из истинной плотности материала зерен ρ_m , по выражению

$$\rho_z = (1 - \varepsilon_{\text{внут}}) \cdot \rho_m, \quad (15)$$

где $\varepsilon_{\text{внут}}$ – внутренняя пористость зерна, м³/м³;
 ρ_m – истинная плотность материала зерна, кг/м³.

Таким образом, на основании математических преобразований можно определить эквивалентный диаметр порового пространства d_p .

В поровом пространстве можно выделить среднюю скорость и скорость скольжения газового потока в качестве определяющей величины.

В аппаратах с зернистым слоем при изучении законов движения газа в поровом пространстве используют условную скорость.

На все сечение аппарата со слоем зернистого материала рассчитывается средняя скорость u , м/с. Если обозначить через F (м²) площадь этого сечения, а объемный расход газа через Q (м³/с), получим выражение для определения средней скорости во всем сечении аппарата с зернистым слоем

$$u = Q / F, \quad (16)$$

где Q – объемный расход газа, м³/с;
 F – площадь сечения всего зернистого слоя в аппарате, м².

Конструкция зернистого газоочистного теплоутилизатора представлена на рисунке 4.

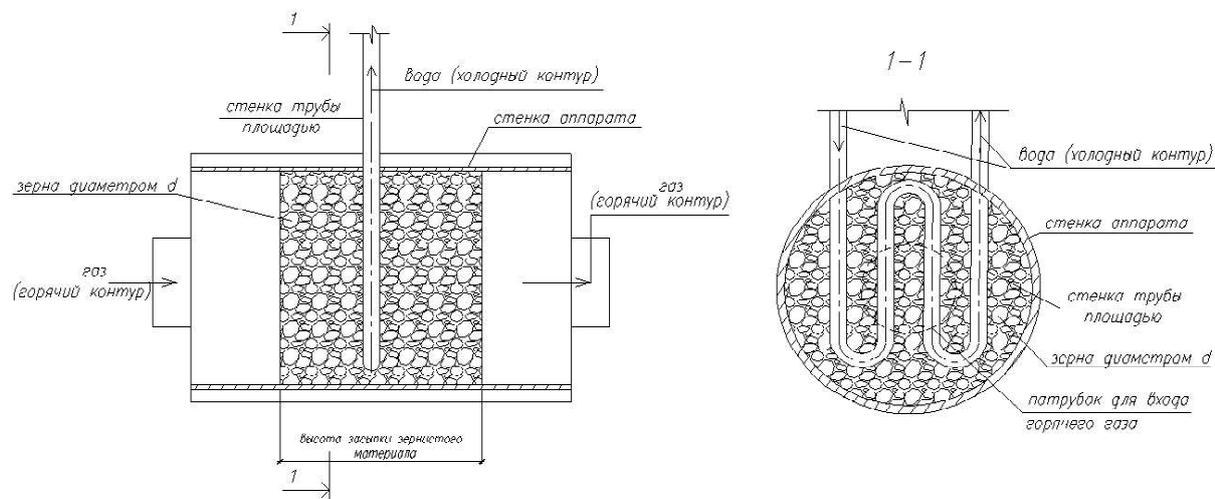


Рисунок 4 – Конструкция зернистого очистного теплоутилизатора.

В поровом пространстве зернистого материала истинная средняя скорость газового потока u_3 связана со средней скоростью u . Среднюю скорость в пространстве между зёрнами может быть определена из выражения

$$u_3 = \frac{u}{\varepsilon} \quad (17)$$

Для определения структуры потока и гидравлического сопротивления слоя зерен найдем эквивалентный критерий Рейнольдса Re_3 через истинную скорость и эквивалентный диаметр d_3 каналов неправильного сечения из выражения

$$Re_3 = \frac{u_3 \cdot d_3}{\nu} = \frac{4 \cdot u}{a \cdot \nu} \quad (18)$$

При движении газа по каналам пор зернистого материала турбулентный режим движения соответствует значению критерия Рейнольдса более 50 ($Re > 50$) [17–20].

Так как поровые каналы имеют разнообразную форму с расширениями, сужениями, поворотами это влечет за собой сильную и довольно раннюю турбулизацию газовой фазы.

В работах таких авторов как, Д. Хаппель, Р. Пфеффер, К. Касик, Д. Карберри, представлена модель стесненного обтекания сферических частиц, которая легла в основу теоретического решения задачи тепло-массообмена в зернистом слое [18]. В связи с тем, что в модели использовались сферические частицы, что затрудняет её использование для реальных технологических условий учёными Г. А. Витковым, Л. П. Хлопановым и С. Н. Шерстневым была предпринята попытка устранить эти недостатки с предложением своей модели теплопереноса в критериальной форме [19]

$$Nu_{жд} = Pr_{ж}^{1/3} \left(\frac{\varepsilon}{3\pi}\right)^{1/3} \cdot \left(Re + \frac{n}{5,65} Re^2\right)^{1/3}, \quad (19)$$

где n – количество частиц в единице объема слоя зернистого материала определяется как отношение объема, занятого частицами $(1 - \varepsilon)$, к объему одной частицы. Величину n можно определить по формуле

$$n = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\pi d_{зз}^3}. \quad (20)$$

Выражение (19) по форме отвечает теплопереносу в условиях турбулентного течения газа по каналам засыпки в изолированной среде.

Для определения среднего коэффициента теплоотдачи для всего слоя в аппарате со стационарным зернистым слоем воспользуемся формулами В. Н. Тимофеева, которые дают хорошие результаты для частиц правильной или приближенной к ней форме [17].

$$20 < Re \leq 200;$$

$$Nu_{сл} = 0,106 \cdot Re_{сл}; \quad (21)$$

$$Re > 200;$$

$$Nu_{сл} = 0,61 \cdot Re_{сл}^{0,67}. \quad (22)$$

Из выражения Р. Ешара число Нуссельта можно определить через величину порозности слоя ε , что, в свою очередь, влияет на интенсивность теплопереноса от газа к поверхности частиц, из уравнения

$$Nu_{\varepsilon} = \frac{2\varepsilon}{(1 - \varepsilon)} + Re_{\varepsilon}^{0,5} + 0,005 Re_{\varepsilon}. \quad (23)$$

Выражение (23) имеет место для однородного по размерам частиц слоя при $Pr = 0,7$ и $100 < Re < 4\,000$. Таким образом, на основании математических преобразований, подставляя значения в формулу 6, найдем коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку.

Коэффициент теплоотдачи при течении воды в трубе определяем из выражения

$$\alpha_{в} = \frac{Nu \cdot \lambda_{в}}{d_{вн}}; \quad (24)$$

$$Re_{в} = \frac{\omega_{в} \cdot d_{вн}}{\nu_{в}}, \quad (25)$$

где $d_{вн}$ – внутренний диаметр трубки, м;

$\omega_{в}$ – скорость движения воды в трубе, м/с. Скорость течения в трубах рекуперативных теплообменных аппаратов принимается в пределах от 1 до 3 м/с;

$\nu_{в}$ – кинематическая вязкость воды при температуре 15 °С ... $1,156 \cdot 10^{-6}$ м²/с;

$Re_{в} = \frac{1 \cdot 0,012}{1,156 \cdot 10^{-6}} = 10\,380$, что соответствует турбулентному режиму движения жидкости в трубах.

$$Nu_{жд} = 0,021Re_{жд}^{0,8} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}}\right)^{0,25} \cdot \bar{\varepsilon}_l, \quad (26)$$

где $\bar{\varepsilon}_l$ – средний поправочный коэффициент [14], определяемый в зависимости от соотношения длины трубы к ее внутреннему диаметру. По соотношениям экспериментальных данных $\bar{\varepsilon}_l$ в нашем случае будет равен 1;

$Pr_{ст}$ – число Прандтля стенки трубки, принимается по параметрам для жидкости (воды) на границе со стенкой, которая контактирует с горячим отходящим газом при температуре 150 °С.

Долю от всей площади трубы, где передача теплоты осуществляется вынужденной конвекцией можно определить по формуле

$$F_{в.к.} = \pi \cdot d_{н.тр} \cdot l_{тр} - \varepsilon \cdot \pi \cdot d_{н.тр} \cdot l_{тр}, \quad (27)$$

где $d_{н.тр}$ – наружный диаметр трубки, м;
 $l_{тр}$ – длина трубки, м.

Передача теплоты теплопроводностью через многослойную стенку

$$q_l = \frac{2\pi(t_g - t_b)}{\frac{1}{\lambda_3} \cdot \ln \frac{d_{нар}}{d_{вн}} + \frac{1}{\lambda_{тр}} \cdot \ln \frac{d_3}{d_{нар}}}, \quad (28)$$

где t_g, t_b – температура газов и воды в трубке, °С;
 λ_3 – коэффициент теплопроводности материала зерна из шамотной крошки, Вт/м·град;
 $\lambda_{тр}$ – коэффициент теплопроводности материала стенки трубы, Вт/м·град;
 $d_{вн}, d_{нар}$ – внутренний и наружный диаметр трубки, м;
 d_3 – диаметр зерна шамотной крошки, м.

Для слоя из элементов неправильной формы, диаметр зерна может быть определен как диаметр шара равной поверхности. Введем эквивалентный диаметра зерна $d_{эз}$, который эквивалентен диаметру шара, определяемый по формуле

$$d_{эз} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}, \quad (29)$$

где $d_{эз}$ – эквивалентный диаметр зерна;
 V – объем единичного зерна, м³.

Для частиц шамотной крошки эквивалентный диаметр определяется методом измерений величины самих зерен. Определяем три размера частицы – длину δ_1 , ширину δ_2 и толщину δ_3 , по которым объем частицы зерна может быть приближенно оценен с помощью эмпирического соотношения [15, 16]:

$$V = \frac{\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3}{2,2}, \quad (30)$$

где $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ – длина, ширина и толщина единичного зерна, м.

Отсюда эквивалентный диаметр зерна шамотной крошки выражается формулой

$$d_{эз} = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \delta_3}{\pi \cdot 2,2}}. \quad (31)$$

Долю от всей площади трубы, где передача теплоты осуществляется теплопроводностью определим через пористость зернистого слоя

$$F_{тепл} = \pi \cdot d_{н.тр} \cdot l_{тр}, \quad (32)$$

где $d_{н.тр}$ – наружный диаметр трубки, м;
 $l_{тр}$ – длина трубки, м.

Подставив полученные в результате аналитических исследований значения в формулу (1), определяем количество теплоты передаваемое в запыленном потоке от горячего к холодному контуру в слое зернистого теплоносителя при условии свободного от частиц пыли порового пространства.

ВЫВОДЫ

На основании рассмотренных выше процессов теплопередачи в газоочистном зернистом теплоутилизаторе получена модель для определения количества теплоты в зернистом слое, передаваемого от горячего газового потока через промежуточный зернистый слой вторичному холодному теплоносителю через стенку трубки. Полученная модель теплопередачи позволяет выделить основные факторы для планирования эксперимента по утилизации теплоты и очистке газа в аппарате зернистого типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Удовиченко, З. В. Очистка и утилизация теплоты отходящих газов в аппаратах с зернистым слоем в промышленности строительных материалов / З. В. Удовиченко, Д. В. Савич, В. П. Демешкин. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2022. – Выпуск 2022-5(157) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 27-33. – URL: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2022/2022-5\(157\)/st_04_udovichenko_savich_demeschkin.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2022/2022-5(157)/st_04_udovichenko_savich_demeschkin.pdf) (дата публикации: 21.11.2022).
2. Самойлова, Е. Э. Совершенствование технологии очистки газовых выбросов производства асфальтобетонных смесей / Е. Э. Самойлова, Т. Д. Лысикова. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2023. – Выпуск 2023-5(163) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 99–103. – URL: [https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2023/2023-5\(163\)/st_15_samojlova_lysikova.pdf](https://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2023/2023-5(163)/st_15_samojlova_lysikova.pdf) (дата обращения: 02.09.2023).
3. Российская Федерация. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации : Федеральный закон № 261-ФЗ : [принят Государственной Думой 11 ноября 2009 года : одобрен Советом Федерации 18 ноября 2009 года : редакция от 14.07.22 г.]. – Москва : Кремль. – 51 с. – Текст : непосредственный.
4. Российская Федерация. Законы. Об охране атмосферного воздуха : Федеральный закон № 96-ФЗ : [принят Государственной Думой 2 апреля 1999 года : одобрен Советом Федерации 22 апреля 1999 года : с внесенными изменениями от 13.06.23]. – Москва : Кремль. – URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/13789> (дата обращения: 02.09.2024). – Текст : электронный.
5. Чугунова, И. А. Обеспыливание вентиляционных выбросов насыпными комбинированными фильтрами при производстве огнеупоров : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Чугунова Ирина Анатольевна ; Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Воронеж, 2013. – 170 с. – Текст : непосредственный.
6. Кабанов, С. Ю. Комбинированный зернистый фильтр : специальность 05.02.13 «Машины, агрегаты и процессы» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кабанов Сергей Юрьевич ; Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова. – Белгород : БГТУ, 2011. – 171 с. – Текст : непосредственный.
7. Шарапов, Р. Р. Зернистые фильтры со стационарным фильтрующим слоем : монография / Р. Р. Шарапов, В. А. Уваров, С. Ю. Кабанов / Белгородский государственный технологический университет. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2011. – 120 с. – Текст : непосредственный.
8. Григорьев, С. А. Совершенствование метода комплексной утилизации теплоты и адсорбционной очистки топочных газов теплогенерирующих установок : специальность 05.23.03 «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Григорьев Сергей Александрович ; Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. – Воронеж, 2006. – 133 с. – Текст : непосредственный.
9. Удовиченко, З. В. Использование зернистых теплоносителей для утилизации теплоты отходящих газов стекольного производства / З. В. Удовиченко, В. Ф. Губарь. – Текст : непосредственный // Труды молодых ученых. В 2 частях ; часть 2. – Санкт-Петербург : [б. и.], 1999. – С. 121–125.
10. Патент № 2 116 117 С1 Российской Федерации, МПК В01D 46/30(2006.01). Зернистый фильтр : № 96100088/25 : заявл. 01.03.1996 : опубл. 27.07.1998 / Шукина Т. В. ; заявитель Воронежская государственная строительная академия. – 7 с. : ил. – Текст : непосредственный.
11. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача : учебное пособие для вузов / В. В. Нащокин. – Москва : Высшая школа. – 1969. – 560 с. – Текст : непосредственный.
12. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – изд. 2-е, стереотип. – Москва : Энергия. – 1977. – 344 с. – Текст : непосредственный.
13. Кутателадзе, С. С. Основы теории теплообмена / С. С. Кутателадзе. – Москва : Атомиздат, 1979. – 416 с. – Текст : непосредственный.

14. Мирошниченко, И. В. Основы кондуктивного теплопереноса : учебное пособие / И. В. Мирошниченко, М. А. Шеремет. – Томск : Издательство Томского государственного университета. – 2022. – 110 с. – ISBN 978-5-907442-95-5. – Текст : непосредственный.
15. Аэров, М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – Ленинград : Химия, 1979. – 176 с. – Текст : непосредственный.
16. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Ленинград : Химия, 1968. – 512 с. – Текст : непосредственный.
17. Белоглазов, И. Н. Основы расчета фильтрационных процессов / И. Н. Белоглазов, В. О. Голубев. – Москва : Издательский дом «Руда и Металлы», 2002. – 210 с. – Текст : непосредственный.
18. Хаппель, Д. Ж. Гидродинамика при малых числах Рейнольдса / Д. Ж. Хаппель, Г. Бреннер. – Москва : Мир, 1976. – 486 с. – Текст : непосредственный.
19. Витков, Г. А. Гидравлическое сопротивление и теплообмен / Г. А. Витков, Л. П. Холпанов, С. Н. Шерстнев. – Москва : Наука, 1994. – 270 с. – Текст : непосредственный.
20. Мухин, В. А. Исследование процессов теплообмена при фильтрации в пористых средах / В. А. Мухин, Н. Н. Смирнова. – Новосибирск : Институт теплофизики, 1978. – 28 с. – Текст : непосредственный.

Информация об авторе

Савич Дарья Владимировна – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Колосова Нелли Вадимовна – кандидат технических наук, доцент; доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Удовиченко Злата Викторовна – кандидат технических наук, доцент; заведующий кафедрой теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции Донбасской национальной академии строительства и архитектуры, ДНР, Макеевка, Россия. Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Information about the author

Savich Darya V. – Senior Lecturer, Department of Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: energy saving in heat and gas supply and ventilation systems.

Kolosova Nelly V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor; Associate Professor, Department of Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: energy saving in heat and gas supply and ventilation systems.

Udovichenko Zlata V. – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head of Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture, DPR, Makeevka, Russia. Scientific interests: energy saving in heat and gas supply and ventilation systems.

Статья поступила в редакцию 23.09.2024; одобрена после рецензирования 18.10.2024; принята к публикации 25.10.2024.

The article was submitted 23.09.2024; approved after reviewing 18.10.2024; accepted for publication 25.10.2024.