

EDN: **VOCVCL**

УДК 697.328

Д. В. САВИЧ, З. В. УДОВИЧЕНКО, Н. В. КОЛОСОВАФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
Российская Федерация, Донецкая Народная Республика, г. о. Макеевский, г. Макеевка

ПРОЦЕССЫ НАГРЕВА ВОДЫ В ЗАСЫПНОМ СЛОЕ АППАРАТОВ ЗЕРНИСТОГО ТИПА

Аннотация. В современных условиях ограниченности энергетических ресурсов, высокой стоимости энергии, негативного воздействия на окружающую среду выбросов промышленных производств актуальным является вопрос применения энерго- и природосберегающих технологий в промышленности строительных материалов. В этой связи одним из путей повышения экономичности и экологичности энерготехнологических установок является совершенствование конструкций существующих аппаратов и создание эффективных комплексных установок, совмещающих в себе процессы очистки и утилизации теплоты отходящих газов. Авторами в статье описаны процессы передачи теплоты в зернистом слое. Разработана модель процессов передачи теплоты от горячего контура через зернистый слой к воде холодного контура через стенки трубок. Схематично показано изменение температуры в слое зернистого материала с расположенными в нем теплообменными трубками. Даны основные выводы по проведенному исследованию процессов теплопередачи в аппарате зернистого типа.

Ключевые слова: комплексная установка, процессы передачи теплоты, зернистый слой, горячий и холодный контур.

ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ

Ресурсосбережение и энергосбережение можно рассматривать как оптимизацию энергетических и материальных потоков существующих технологических процессов. В современных условиях и в перспективе одним из важных путей повышения экономичности и экологичности энерготехнологических установок являются способы совершенствования конструкций существующих аппаратов и создание эффективных комплексных установок очистки и утилизации теплоты отходящих газов промышленности строительных материалов.

В комплексе исследуемых энерготехнологических установок, позволяющих наряду с очисткой уходящих газов при производстве строительных материалов использовать их теплоту, нашли применение зернистые фильтры с установкой в толще засыпного слоя трубок для утилизации теплоты от горячего контура [1].

ЦЕЛЬ

Проанализировать процессы теплообмена в слое зернистого фильтра с теплообменными трубками, продуваемыми горячим запыленным газом от сушильных барабанов огнеупорного производства, с описанием процессов передачи теплоты между холодным и горячим контурами.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для определения интенсивности теплообмена между запыленным газом и вторичным теплоносителем через стенку рекуперативного теплообменного аппарата (ТА), расположенного в слое зернистого материала, рассмотрим процессы передачи теплоты в зернистом фильтре.

Вопросы, связанные с применением зернистой насадки для интенсификации теплообмена подробно изложены в работах [2–4], где отмечается, что в трубе с неподвижным слоем зернистого материала, пронизываемого потоком газа, коэффициент теплоотдачи возрастает в сравнении с отсутствием зернистого наполнителя примерно в 2–5 раз. Таким образом, рассмотрение процессов теплообмена,

© Д. В. Савич, З. В. Удовиченко, Н. В. Колосова, 2023



определение коэффициента теплопередачи от неподвижного зернистого слоя холодному контуру через стенки трубок, пронизываемых потоком нагретого газа, имеет большое значение в инженерной практике и для систем теплогазоснабжения производственных объектов.

В неподвижном слое теплообмен протекает в условиях стационарного режима.

Моделирование процессов тепломассообмена в зернистых аппаратах заключается в создании модели, которая описывает процессы протекающие при непосредственном контакте запыленного газа с зерновым слоем.

В пылегазоочистном теплообменном аппарате происходит сложный процесс тепломассообмена. Как правило, рассматривают два процесса обособленно друг от друга:

- теплообмен – передача теплоты от горячего газа (горячий контур) нагреваемой воде (холодный контур теплоносителя) через промежуточный зернистый теплоноситель. При этом горячий и холодный контуры разделены поверхностью теплообмена, в качестве которой выступает стенка трубы, входящей в трубный пучок теплообменного аппарата;

- массообмен – абсорбция пылевых частиц из газового потока зернами промежуточного теплоносителя.

Так как первоначально интерес представляет создание математической модели передачи теплоты от зерен к воде через стенку, подробно рассмотрим первый процесс – теплообмен между горячим и холодным контурами.

В общем случае теплообмен в слое осуществляется передачей теплоты от газа зернам теплопроводностью, конвекцией и излучением; передачей теплоты в самой частице теплопроводностью и передачей теплоты от частицы к частице конвективным путем.

В работах [5, 6] отмечено, что при температуре горячего контура выше 300 °С доля переноса теплоты излучением в зернистом слое становится заметной. Поскольку температура отходящих газов не более 300 °С, то передачей теплоты излучением можно пренебречь.

Рассмотрим тепловые процессы, протекающие в очистном теплоутилизационном аппарате зернистого типа, упрощенная схема которого представлена на рисунке 1.

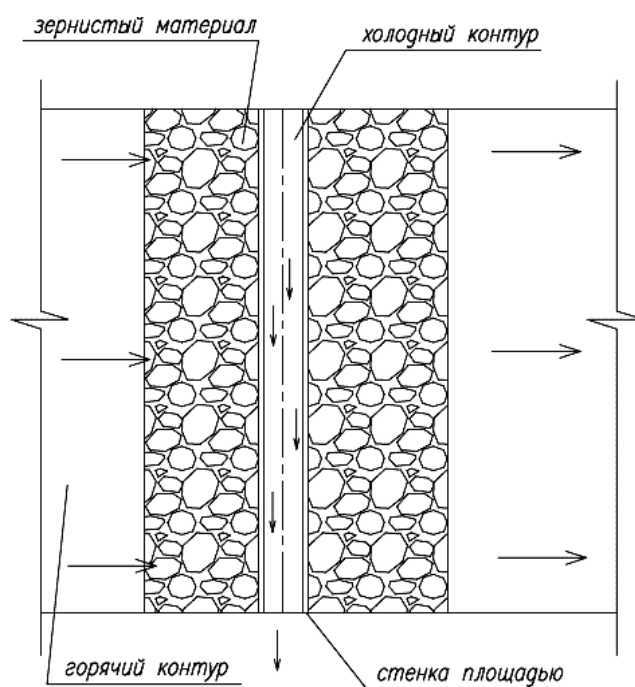


Рисунок 1 – Упрощенная схема аппарата зернистого типа.

Газовый поток горячего контура проходит через зернистый наполнитель, разделяющий два контура, и отдает тепловую энергию зернам. Так как зерна не плотно прилегают к наружной стенке трубы ТА, можно считать, что нагретый поток газа будет отдавать тепловую энергию и свободной поверхности трубы. Вода в холодном контуре нагревается за счет теплоты полученной от внутренней стенки трубы.

В качестве горячего контура служат отходящие газы сушильных барабанов огнеупорного производства, как низкопотенциальный вторичный энергетический ресурс, с температурой отходящих газов 75...150 °С в зависимости от технологического процесса барабанных сушил для сушки глины; в качестве холодного контура – холодная вода, которая, нагреваясь, идет на бытовые нужды и используется как резервный ресурс для технологических процессов.

Количество передаваемой теплоты будет зависеть от ряда факторов

$$Q = f(d_3, \varepsilon, M_3, t_2, v_2, XYZ_m, G_\theta, H_3), \quad (1)$$

где d_3 – диаметр зерна;
 ε – порозность зернистого пространства;
 M_3 – материал зерна, пористость;
 t_2, v_2 – температура и скорость газа;
 XYZ_m – геометрические характеристики рекуперативного теплообменника;
 G_θ – расход воды в ТА, материал трубок;
 H_3 – высота слоя зернистого наполнителя.

В качестве материала засыпки используется шамотный бой разной огнестойкости и кварцевый песок. По экспериментальным данным [7] можно судить о целесообразности ограничения наращивания высоты отдельного зернистого слоя до $20 \cdot 10^{-3}$ м насыпного комбинированного фильтра, а так же по данным [8] наиболее эффективной высотой слоя засыпки принят общий слой до $150 \cdot 10^{-3}$ м, так как при дальнейшем увеличении значения высоты зернистого слоя коэффициент проскока практически не меняется, а гидравлическое сопротивление возрастает.

Передача теплоты осуществляется теплопроводностью между зерном и стенкой трубы, а также вынужденной конвекцией от газа к стенке. Схема передачи теплоты показаны на рисунке 2.

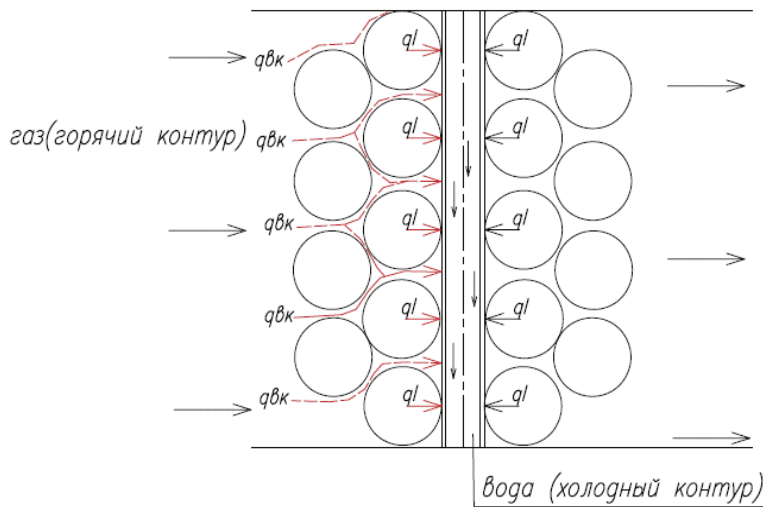


Рисунок 2 – Схема передачи теплоты в аппарате зернистого типа.

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

$$Q_l = F_{\text{метл}} \cdot q_l + F_{\text{в.к.}} \cdot q_{\text{в.к.}}, \quad (2)$$

где q_l – линейный тепловой поток, Вт/м, который в свою очередь зависит от диаметра и материала зерен

$$q_l = f(d_3, \lambda_3), \quad (3)$$

$q_{\text{в.к.}}$ – линейный тепловой поток, передаваемый с помощью вынужденной конвекции

$$q_{\text{в.к.}} = f(t_2, v_2), \quad (4)$$

t_2 – температура газового потока, °С;
 v_2 – скорость газового потока, м/с.

Таким образом можно предположить, что общая площадь поверхности трубок с холодным контуром можно представить с помощью выражения

$$F_{\text{тр}} = A \cdot F_{\text{тр}} + B \cdot F_{\text{тр}}, \quad (5)$$

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

Опираясь на законы теплообмена, температура горячего контура t_2 (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 представлено на рисунке 3.

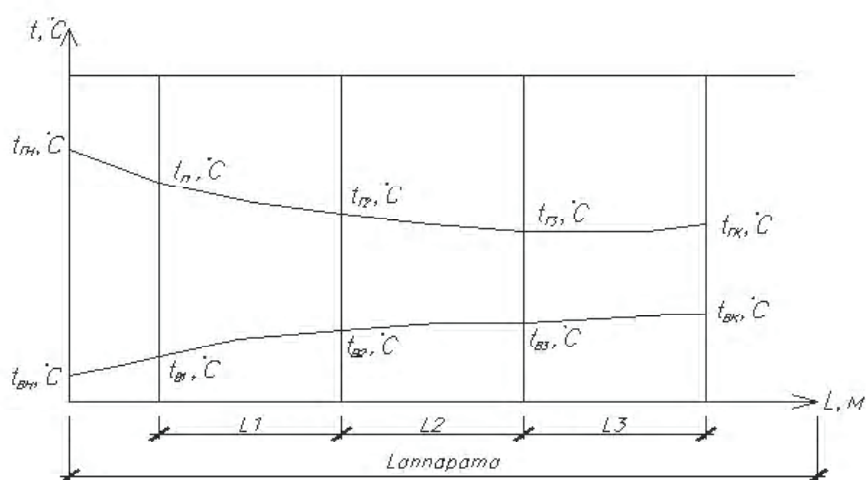


Рисунок 3 – Изменение температуры в зернистом слое.

На графике изменения температуры в зернистом слое (рис. 3) $t_{ГН}$, $t_{Г1}$, $t_{Г2}$, $t_{Г3}$, $t_{ГК}$ – температура газа (горячего контура) на входе в аппарат, соответственно, в каждом из слоев зернистого наполнителя и на выходе из зернистого теплоутилизатора, °С; $t_{БН}$, $t_{Б1}$, $t_{Б2}$, $t_{Б3}$, $t_{БК}$ – температура воды в трубках (холодного контура) на входе в аппарат, соответственно, в каждом из слоев зернистого наполнителя и на выходе из зернистого теплоутилизатора, °С; L , L_1 , L_2 , L_3 – длина теплоутилизатора и, соответственно, 1-го, 2-го и 3-го слоя зернистой засыпки.

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

ВЫВОДЫ

В статье проанализирован процесс теплообмена в слое зернистого фильтра с теплообменными трубками, продуваемыми горячим запыленным газом от сушильных барабанов, с описанием процессов передачи теплоты между холодным и горячим контурами.

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. – [http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2022-5\(157\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2022-5(157).pdf) (дата публикации: 21.11. 2022).
2. Лева, М. Псевдоожоужение / М. Лева ; [перевод с английского В. Г. Айнштейна ; под редакцией проф. Н. И. Гельперина]. – Москва : Гостоптехиздат, 1961. – 400 с. – Текст : непосредственный.

3. Гельперин, Н. И. Основы техники псевдооживления / Н. И. Гельперин, В. Г. Айнштейн, В. Б. Кваша. – Москва : Химия, 1967. – 664 с. – Текст : непосредственный.
4. Аэродинамические способы повышения эффективности систем и аппаратов пылеулавливания в производстве огнеупоров : [монография] / В. И. Энтин, Ю. В. Красовицкий, Н. М. Анжеуров [и др.]. – Воронеж : Издательство «Истоки». – 1998. – 362 с. – ISBN 5-88242-085-7. – Текст : непосредственный.
5. 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.
6. Шарапов, Р. Р. Зернистые фильтры со стационарным фильтрующим слоем / Р. Р. Шарапов, В. А. Уваров, С. Ю. Кабанов : монография / Белгородский государственный технологический университет. – Белгород : Белгородский государственный технологический университет, 2011. – 120 с. – Текст : непосредственный.
7. 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.
8. 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, 2011. – 171 с. – Текст : непосредственный.

Получена 09.10.2023

Принята 27.10.2023

Д. В. САВИЧ, З. В. УДОВИЧЕНКО, Н. В. КОЛОСОВА
ПРОЦЕСИ НАГРІВУ ВОДИ В ЗАСИПНОМУ ШАРІ АПАРАТІВ ЗЕРНИСТОГО
ТИПУ

ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури», Російська
Федерація, Донецька Народна Республіка, м. о. Макіївський, м. Макіївка

Анотація. В сучасних умовах обмеженості енергетичних ресурсів, високої вартості енергії, негативного впливу на навколишнє середовище викидів промислових виробництв актуальним є питання застосування енерго- і природозберігаючих технологій в промисловості будівельних матеріалів. У зв'язку з цим одним із шляхів підвищення економічності та екологічності енерготехнологічних установок є вдосконалення конструкцій існуючих апаратів і створення ефективних комплексних установок, що поєднують в собі процеси очищення та утилізації теплоти газів, що відходять. Авторами в статті описані процеси передачі теплоти в зернистому шарі. Розроблено модель процесів передачі теплоти від гарячого контуру через зернистий шар до води холодного контуру через стінки трубок. Схематично показано зміна температури в шарі зернистого матеріалу з розташованими в ньому теплообмінними трубками. Дано основні висновки по проведеному дослідженні процесів теплопередачі в апараті зернистого типу.

Ключові слова: комплексна установка, процеси передачі теплоти, зернистий шар, гарячий і холодний контур.

DARIA SAVICH, ZLATA UDOVICHENKO, NELLY KOLOSOVA
PROCESSES OF HEATING WATER IN THE BACKFILL LAYER OF GRANULAR-
TYPE DEVICES

FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture», Russian
Federation, Makeevka

Abstract. In modern conditions of limited energy resources, high energy costs, and the negative impact of industrial emissions on the environment, the issue of applying energy and environmentally-saving technologies in the building materials industry is relevant. In this regard, one of the ways to increase the efficiency and environmental friendliness of energy technology installations is to improve the designs of existing devices and create effective complex installations that combine the processes of cleaning and recycling the heat of waste gases. The authors of the article describe the processes of heat transfer in the granular layer. A model has been developed for the processes of heat transfer from the hot circuit through the granular layer to the water of the cold circuit through the walls of the tubes. The temperature change in a layer of granular material with heat exchange tubes located in it is schematically shown. The main conclusions from the study of heat transfer processes in a granular-type apparatus are given.

Keywords: complex installation, heat transfer processes, granular layer, hot and cold circuit.

Савич Дарья Владимировна – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Удовиченко Злата Викторовна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Колосова Нелли Вадимовна – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

Савич Дар'я Володимирівна – старший викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоощадження в системах теплогазопостачання та вентиляції.

Удовиченко Злата Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент; завідувач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоощадження в системах теплогазопостачання та вентиляції.

Колосова Неллі Вадимівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ФДБОУ ВО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергоощадження в системах теплогазопостачання та вентиляції.

Savich Daria – senior lecturer, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, FSBEI HE «Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture». Scientific interests: energy saving in heat and gas supply and ventilation systems.

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

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