

EDN: FRWBFV

УДК 66.048

**З. В. УДОВИЧЕНКО, Д. В. САВИЧ, В. П. ДЕМЕШКИН**

ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

## **ОЧИСТКА И УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ В АППАРАТАХ С ЗЕРНИСТЫМ СЛОЕМ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

**Аннотация.** В статье акцентируется внимание на решение вопроса повышения энергосбережения отрасли строительного производства за счет одновременной очистки и утилизации теплоты отходящих газов оборудования. Среди методов и средств решения таких вопросов важное место занимают сухие способы очистки газов с помощью фильтров со стационарными и движущимися зернистыми слоями. Приведены основные характеристики зернистого материала и эффективность его использования в качестве промежуточного теплоносителя. Рассмотрены известные зернистые аппараты для очистки и одновременной утилизации теплоты отходящих газов. Предложены варианты установки трубчатых теплообменных аппаратов в толще зернистого материала с указанием достоинств и недостатков каждого из вариантов. Представлены экспериментальные данные установки зернистого фильтра с компоновкой в толще зернистого материала тепловых труб, по данным которых можно судить о возможности и эффективности утилизации теплоты отходящих газов совместно с их очисткой [1]. Даны основные выводы об эффективности и целесообразности применения комплексного метода очистки и утилизации теплоты отходящих газов оборудования строительного производства.

**Ключевые слова:** зернистый слой, утилизация теплоты, очистка, тепловые трубы, теплообменный аппарат, отходящие газы.

### **ФОРМУЛИРОВКА ПРОБЛЕМЫ**

Одной из важнейших научно-технических проблем является энергосбережение и охрана окружающей среды от газообразных выбросов, выделяемых при сгорании твердого, жидкого и газообразного топлива. Экономия топливно-энергетических ресурсов и создание малоотходных технологий при эксплуатации промышленных установок приобретает в настоящее время особую актуальность.

Повышение эффективности работы и экологической безопасности установок за счет применения комплексных систем утилизации теплоты и адсорбционной очистки отходящих газов с последующим использованием уловленных загрязняющих веществ и теплоты является актуальнейшей задачей, решение которой позволит создавать эффективные тепловые схемы и компактные технические решения.

Если по проектированию теплоутилизационных аппаратов исследования разрознены и требуют обобщения в отечественной и зарубежной практике конструирования перечисленных устройств, то по разработке комплексных теплоутилизаторов-адсорберов решение находится на начальном уровне и нуждается в тщательной проработке.

### **ЦЕЛЬ**

Анализ известных аппаратов для комплексной утилизации теплоты и адсорбционной очистки отходящих газов в аппаратах с зернистым слоем.



## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Использование теплоты отходящих газов строительного производства представляет собой сложную техническую задачу, для решения которой необходим комплексный подход, сочетающий очистку газов и утилизацию теплоты.

Производство огнеупорных материалов является одним из основных объектов строительной промышленности, на долю которого приходится существенные объемы выбросов вредных веществ, что пагубно сказывается на здоровье людей.

Отрицательное влияние пылей производства строительных материалов и огнеупоров на человека определяется суммарным токсикологическим воздействием этих пылей на различные органы. Наибольшему влиянию пыли подвержены органы дыхания, в меньшей степени – кожа, глаза, кровь и пищеварительный тракт. При вдыхании пылей огнеупорного производства возникают пневмокониозы, связанные с отложением пыли в легких и реакцией ткани на ее присутствие [2].

Несмотря на то, что за последние годы на предприятиях производства огнеупоров проведены значительные работы по газоочистке (установлены электрофильтры, группы циклонов, рукавные фильтры и группы из них), суммарные выбросы пыли продолжают оставаться высокими [3, 4].

В настоящее время себя положительно зарекомендовали аппараты очистки из сыпучих зернистых материалов. В зернистых насыпных фильтрах задерживающие частицы не связаны между собой. Материал фильтрующего слоя подбирают по необходимой механической и химической стойкости, доступности материала. Они позволяют работать с токсичными агрессивными и со слипающимися пылями. В настоящее время в качестве заполнителя используется сырье (периклаз, шамотный бой, кварцевый песок), возвращаемое вместе с уловленной пылью в технологический процесс.

Фильтрующий материал готовится дроблением и сепарацией для получения требуемых фракций. В большинстве случаев при фильтровании сыпучие материалы неподвижны и частицы пыли осаждаются внутри насыпного слоя. Образование пылевых отложений внутри зернистого слоя обеспечивает его пылеемкость и способствует резкому повышению эффективности пылеулавливания. Фильтрование через пористые слои со связанной структурой отличается высоким перепадом давления и трудностью регенерации.

Слои из зерен неправильной формы обычно более эффективны, чем слои из сферических или окатанных зерен. Зернистым слоям различных типов свойственны единые гидродинамические и кинетические закономерности разделения гетерогенных систем с дисперсной фазой.

Зернистые насыпные слои отличаются искривленными продольными и поперечными каналами с переменной и нерегулярной площадью и формой сечения. В широком диапазоне происходит изменение размера пор под действием различных механизмов осаждения частиц. Промышленная пыль состоит из частиц, имеющих неправильную, шероховатую геометрическую форму, и обычно является полидисперсной системой. Поэтому наибольшее распространение в огнеупорной промышленности получили фильтры с зернистыми слоями.

Наряду с выбросами на производстве имеется значительный потенциал ВЭР [3–4].

Рациональное использование теплоты ВЭР не ограничивается только экономией топлива, а этим материальных и трудовых затрат, а оказывает определенное влияние на улучшение теплового баланса предприятия района, города технико-экономические показатели систем теплоснабжения [5].

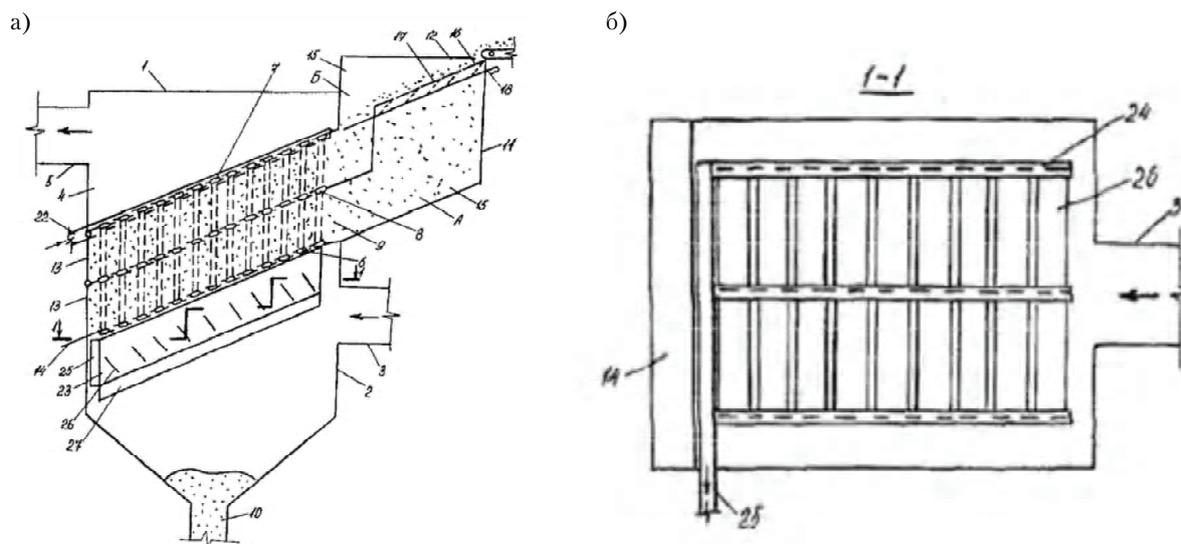
При наличии значительных ВЭР в производстве огнеупоров имеет место разработка перспективных технологий по очистке с одновременной утилизацией сбросного тепла отходящих газов огнеупорного производства.

Большое многообразие видов и конструкций газоочистных и теплоутилизационных устройств обусловлено широким спектром задач и областей их применения [6]. Множество методов и способов утилизации выбросной теплоты и очистки уходящих газов основаны на различных технических и конструктивных решениях.

Рассмотрим известные конструкции зернистых фильтров с одновременной очисткой и утилизацией тепла отходящих газов.

На рисунке 1 приведена конструкция фильтра [7] для очистки загрязненных газов от пыли, в частности от пыли предприятий строительных материалов. Конструкция устройства предусматривает также утилизацию теплоты очищаемых газов.

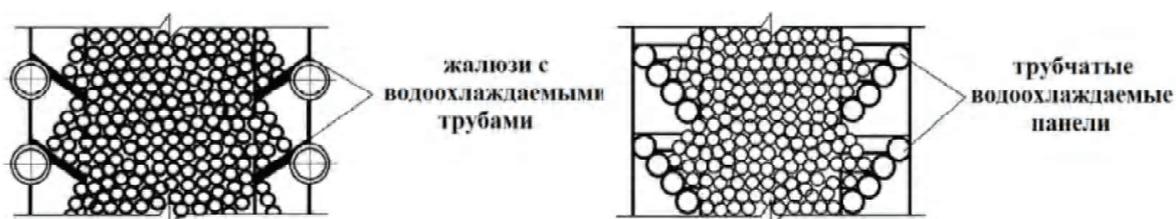
Фильтр позволяет повысить степень очистки загрязненных газов при снижении эксплуатационных затрат за счет поддержания влажного состояния зернистого материала, способствующего более активному налипанию пыли, и создания двухслойовой насадки с крупными и мелкими зёрнами, обеспечивающей снижение аэродинамического сопротивления и увеличение продолжительности непод-



**Рисунок 1** – Зернистый фильтр: а) конструкция; б) разрез 1–1; 1 – корпус, 2 – камера загрязненного газа; 3 – входной патрубок; 4 – камера очищенного газа с выходным патрубком – 5; 6 – жалюзийная решетка в камере загрязненного газа; 7 – основная жалюзийная решетка; 8 – дополнительная жалюзийная решетка; 9 – слой зернистого материала; 10 – разгрузитель для удаления осевших частиц; 11 – бункер; 12 – загрузочное окно для зернистого материала; 13 – откидные крышки; 14 – направляющая для удаления зернистого материала после насыщения пылью; 15 – нижнее и верхнее отделение; 16 – решетка; 17 – консольные пластины; 18 – заслонка; 19 – канал для входа теплоносителя; 20 – трубки с отбойными ребрами волнообразной формы – 21; 22 – коллектор для подвода теплоносителя; 23 – коллектор для отвода теплоносителя; 24 – плоские каналы; 25 – патрубок для выхода теплоносителя; 26 – направляющие пластины коллектора; 27 – вертикальное ребро.

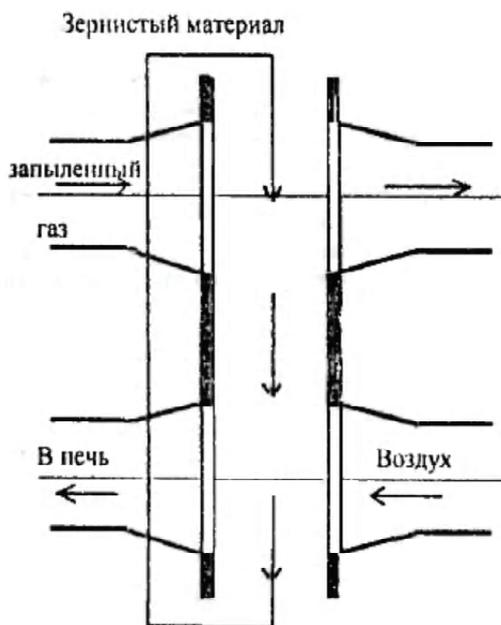
вижного режима ее работы в аппарате. Повышение эффективности утилизации теплоты очищаемого газа достигается при использовании жалюзийных решеток в качестве поверхности теплообмена наряду с погруженными в слой трубами, соединяющими полости жалюзей. Это делает возможным получение высокой температуры теплоносителя на выходе из фильтра [5].

На рисунке 2 представлен зернистый фильтр для возможности фильтрации высокотемпературного газа (до 600...700 °С). Жалюзийные решетки оборудуют водоохлаждаемыми трубами или выполняют в виде трубчатых водоохлаждаемых панелей. Механизм осаждения пыли в зернистых фильтрах представляет собой сочетание касания, зацепления, отсеивания, гравитации, инерции и электростатики.



**Рисунок 2** – Зернистый фильтр сводоохлаждающими трубами.

На рисунке 3 представлена одна из характерных схем конструкции аппарата с подвижным зернистым слоем [8]. Он состоит из двух камер, расположенных одна над другой и загруженных зернистым материалом со средним диаметром 4...6 мм. Слой промежуточного теплоносителя промывается и верхней камере горячими газами, а в нижней – воздухом. Нагретый теплоноситель из верхней камеры через специальное устройство поступает в нижнюю камеру, а оттуда, уже охлажденный, подается в верхнюю камеру специальным подъемником. Движение газа и зернистого материала в каждой камере перекрестное. Нижний предел конечной температуры лимитирован условием предотвращения конденсации водяных паров.



**Рисунок 3** – Фильтр-регенератор с промежуточным теплоносителем в виде зернистого материала.

Использование воздухонагревателя с подвижным зернистым слоем дает возможность утилизировать около 10 % теплоты, теряемой с уходящими газами печи. Наиболее полное использование большей части теплоты требует установки дополнительных устройств, например рекуперативных теплообменников.

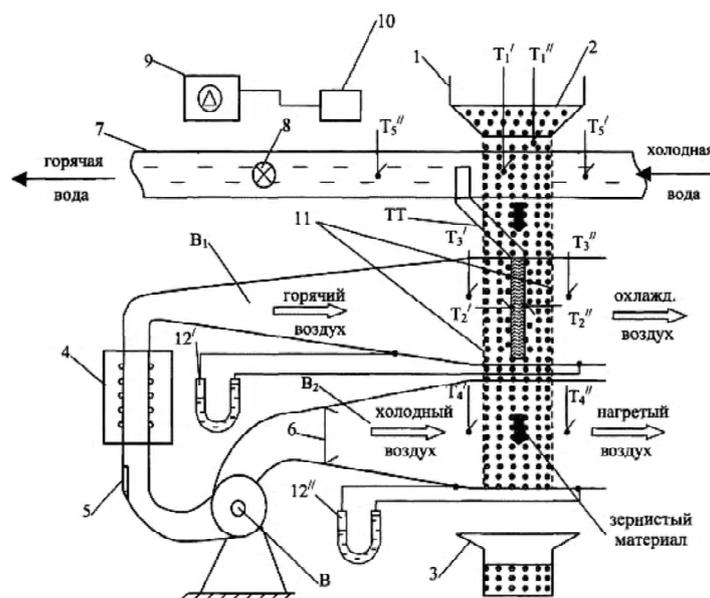
С целью определения возможности очистки газов и использования остаточной их энтальпии для производственных целей, отопления и горячего водоснабжения были исследованы три варианта установки теплоутилизационного оборудования. Данные приведены в таблице 1.

**Таблица 1** – Варианты установки теплоутилизационного оборудования в толще зернистого материала

Варианты установки	Место установки ТА	Достоинства	Недостатки
Первый вариант	Непосредственно в слое зернистого материала (либо в верхней части аппарата либо как в верхней, так и в нижней частях)	Малое загрязнение труб пылевыми отложениями, минимальные потери теплоты	Значительное увеличение габаритных размеров фильтра и его гидравлического сопротивления
Второй вариант	В слое зернистого материала, прошедшего обе части фильтра	Есть возможность утилизировать часть теплоты	Низкая теплопроводность, возможное спекание зерен, увеличение габаритных размеров
Третий вариант	В газоходе за верхней частью зернистого фильтра	Тепловая мощность достигает 1 100 кВт, возможность получать горячую воду	Увеличение габаритных размеров

Оценивая приведенные схемы утилизации теплоты дымовых газов при помощи теплообменников с зернистыми материалами, установлено, что наибольшее количество утилизированной теплоты в виде горячей воды можно получить при использовании схемы фильтра с теплообменником в газоходе за верхней частью зернистого фильтра, то есть третий вариант.

На базе ГОУ ВПО Воронежского государственного архитектурно-строительного университета С. А. Григорьевым [1] была собрана экспериментальная установка для исследования теплообмена в перекрестно продуваемом движущемся плотном зернистом слое с тепловыми трубами, расположенными в его толще. Установка приведена на рисунке 4.



**Рисунок 4** – Общая схема экспериментальной установки: 1 – загрузочный бункер; 2 – движущийся зернистый слой; 3 – приёмный бункер с шибберным устройством; 4 – трубчатая электрическая печь; 5 – ротаметр; 6 – счетчик-расходомер виброакустический СВА; 7 – коллектор с холодной водой; 8 – водяной счетчик; 9 – многоточечный переключатель термопар; 10 – потенциометр; 11 – заградительная сетка; 12, 12'' – U-образные манометры; В – вентилятор; В1, В2 – нагнетательные воздуховоды; Т1' – Т5', Т1'' – Т5'' – термопары; ТТ – тепловые трубы.

В эксперименте проводилось сравнение эффективности утилизации теплоты (нагревом воды в коллекторе 7) с установкой тепловых труб в толще зернистого материала и без него. Экспериментальные данные приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Температура воды в коллекторе

	Расход воды, м <sup>3</sup> /ч			
	20	2	1	0,5
Температура Т5'', °С				
– в опыте без зернистого слоя	21	38,2	56,6	84,2
– в опыте с зернистым слоем	22	39,3	58	86

Увеличение (хотя и незначительное) температуры воды в коллекторе за тепловыми трубами при наличии зернистого слоя можно объяснить различными механизмами теплопередачи. В отсутствие зернистого слоя происходит конвективный теплообмен между дымовыми газами и тепловыми трубами, при наличии зернистого слоя превалирует кондуктивная теплопроводность от более равномерно нагретого газами зернистого материала к стенкам тепловых труб.

## ВЫВОДЫ

Выполнен обзор известных аппаратов с зернистым слоем для очистки и одновременной утилизацией теплоты отходящих газов. Изучены основные характеристики зернистого материала и эффективность его использования в качестве промежуточного слоя для утилизации теплоты и очистки отходящих газов. Рассмотрены варианты установки трубчатых теплообменных аппаратов в толще зернистого материала с движущимся слоем, представлены экспериментальные данные установки зернистого фильтра с компоновкой в толще зернистого материала тепловых труб, которые свидетельствуют о возможности применения комплексных схем для утилизации теплоты с одновременной очисткой отходящих газов промышленности строительных материалов. Теплоутилизаторы-адсорберы со слоем твердого зернистого теплоносителя с установкой в его толще теплообменных трубчатых аппаратов перспективны при использовании их для утилизации теплоты с одновременной адсорбционной очисткой отходящих газов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. – Библиограф.: 122–130. – Текст : непосредственный.
2. Красовицкий, Ю. В. Медико-экологический мониторинг и токсикология пыли огнеупорного производства / Ю. В. Красовицкий, Е. В. Архангельская. – Текст : непосредственный // Новые огнеупоры. – 2003. – Выпуск № 5. Экология. – С. 53–56.
3. Савич, Д. В. Очистка и утилизация дымовых газов на Часовоярском огнеупорном комбинате / Д. В. Савич. – Текст : непосредственный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2013. – Выпуск 2013-5(103) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 36–40.
4. Выборнов, Д. В. Анализ теплового потенциала уходящих газов производства огнеупорной промышленности / Д. В. Выборнов, Б. В. Кляус, Д. В. Савич. – Текст : электронный // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2017. – Выпуск 2017-5(127) Инженерные системы и техногенная безопасность. – С. 44–49. – URL: [http://donnasa.ru/publish\\_house/journals/vestnik/2017/vestnik\\_2017-5\(127\).pdf](http://donnasa.ru/publish_house/journals/vestnik/2017/vestnik_2017-5(127).pdf) (дата публикации: 20.11.2017).
5. Комплексное энерготехнологическое использование газа и охрана воздушного бассейна / Е. Е. Новгородский, В. А. Широков, Б. В. Шанин [и др.]. – Москва : Дело, 1997. – 368 с. – ISBN 5-7749-0056-8. – Текст : непосредственный.
6. Агапов, Ю. Н. Использование теплообменных аппаратов для утилизации и регенерации теплоты низкопотенциальных отходящих газов / Ю. Н. Агапов, А. В. Тарасов, А. В. Санников. – Текст : непосредственный // Научно-технический прогресс в области совершенствования тепловых процессов и новых технологий промышленных установок и ТЭЦ : материалы Всесоюзной научно-технической конференции, Челябинск, 1987. – Челябинск, 1987. – С. 33–35.
7. Патент № 2 116 117 С1 Российской Федерации, МПК В01Д 46/30(2006.01). Зернистый фильтр : № 96100088/25 : заявлено 01.03.1996 : опубл. 27.07.1998 / Шукина Т. В. ; заявитель Воронежская государственная строительная академия. – 7 с. – Текст : непосредственный.
8. Удовиченко, З. В. Использование зернистых теплоносителей для утилизации теплоты отходящих газов стеклольного 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.

Получена 29.09.2022

Принята 28.10.2022

З. В. УДОВИЧЕНКО, Д. В. САВІЧ, В. П. ДЕМЕШКІН  
ОЧИЩЕННЯ ТА УТИЛІЗАЦІЯ ТЕПЛОТИ ВІДХІДНИХ ГАЗІВ В АПАРАТАХ  
ІЗ ЗЕРНИСТИМ ШАРОМ У ПРОМИСЛОВОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ  
МАТЕРІАЛІВ

ДООУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті акцентується увага на вирішенні питання підвищення енергозбереження в галузі будівельного виробництва за рахунок одночасного очищення та утилізації теплоти відхідних газів обладнання. Серед методів і засобів вирішення таких питань важливе місце займають сухі способи очищення газів за допомогою фільтрів зі стаціонарними і зернистими шарами, що рухаються. Наведено основні характеристики зернистого матеріалу та ефективність його використання як проміжного теплоносія. Розглянуто відомі зернисті апарати для очищення та одночасної утилізації теплоти газів, що відходять. Запропоновано варіанти встановлення трубчастих теплообмінних апаратів у товщі зернистого матеріалу із зазначенням переваг та недоліків кожного з варіантів. Представлені експериментальні дані установки зернистого фільтра з компонуванням в товщі зернистого матеріалу теплових труб, за даними яких можна судити про можливість та ефективність утилізації теплоти газів, що відходять, спільно з їх очищенням [1]. Дано основні висновки щодо ефективності та доцільності застосування комплексного методу очищення та утилізації теплоти відхідних газів обладнання будівельного виробництва.

**Ключові слова:** зернистий шар, утилізація теплоти, очищення, теплові труби, теплообмінний апарат, гази, що відходять.

ZLATA UDOVICHENKO, DARYA SAVICH, VALENTIN DEMESHKIN  
PURIFICATION AND UTILIZATION OF THE HEAT OF EXHAUST GASES IN  
APPARATUSES WITH A GRANULAR BED IN THE BUILDING MATERIALS  
INDUSTRY

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article focuses on the solution of the issue of increasing the energy saving of the construction industry due to the simultaneous purification and utilization of the heat of the exhaust gases of the equipment. Among the methods and means of solving such problems, an important place is occupied by dry methods of gas purification using filters with stationary and moving granular layers. The main characteristics of the granular material and the efficiency of its use as an intermediate coolant are given. The well-known granular devices for cleaning and simultaneous utilization of the heat of exhaust gases are considered. Options for installing tubular heat exchangers in the thickness of a granular material are proposed, indicating the advantages and disadvantages of each of the options. Experimental data are presented for a granular filter installation with a layout with a thicker granular material of heat pipes, according to which one can judge the possibility and efficiency of waste gas heat recovery together with their purification [1]. The main conclusions about the effectiveness and expediency of using an integrated method for cleaning and utilizing the heat of waste gases from building production equipment are given.

**Key words:** granular layer, heat recovery, purification, heat pipes, heat exchanger, exhaust gases.

**Удовиченко Злата Викторовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Савич Дарья Владимировна** – ассистент кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Демешкин Валентин Павлович** – старший преподаватель кафедры теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: энергосбережение в системах теплогазоснабжения и вентиляции.

**Удовиченко Злата Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Савіч Дар'я Володимирівна** – асистент кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження в системах теплогазопостачання і вентиляції.

**Демешкін Валентин Павлович** – старший викладач кафедри теплотехніки, теплогазопостачання та вентиляції ДДУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: енергозбереження у системах теплогазопостачання та вентиляції.

**Udovichenko Zlata** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heatsaving in systems of a heat-gassupply and ventilation.

**Savich Darya** – assistant, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: heatsaving in systems of a heat-gassupply and ventilation.

**Demeshkin Valentin** – Senior Lecturer, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: energy saving in heat and gas supply and ventilation systems.