

УДК 622.7-913.3.001.57

Дякун І.Л., канд. техн. наук,
Кирсанов М.В., магістр
(ІГТМ НАН України)

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ОТ ДИОКСИДА СЕРЫ ПРИ НАЛОЖЕНИИ ПУЛЬСАЦИЙ НА ИХ ПОТОК

Дякун І.Л., канд. техн. наук,
Кирсанов М.В., магістр
(ІГТМ НАН України)

ИНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ ОЧИСТКИ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ДІОКСИДУ СІРКИ ПРИ НАКЛАДАННІ ПУЛЬСАЦІЙ НА ЇХ ПОТІК

Dyakun I.L., Ph. D. (Tech.),
Kirsanov M.V., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

INTENSIFICATION OF THE FLUE GAS CLEANING FROM SULFUR DIOXIDE AT IMPOSING PULSATIONS ON THE GAS FLOW

Аннотация. В статье предложен метод интенсификации процесса очистки дымовых газов от сернистых соединений для использования в теплообменных аппаратах, который позволит повысить экологическую, энергетическую эффективность предприятий, а также улучшить их экономические показатели. Рассмотрены способы и оборудование для полезного использования тепла дымовых газов. Для обеспечения работы данного оборудования в составе шахтных энергетических комплексов обоснована необходимость применения контактных теплообменных аппаратов. На основе анализа особенностей теплофизических процессов в контактных теплообменных аппаратах рекомендованы конструкции оросительных форсуночных и центробежных теплообменных аппаратов. Контактные теплообменные аппараты этих конструкций обладают значительным ресурсом интенсификации теплофизических процессов. Рассмотрены различные способы очистки от диоксида серы дымовых газов, которые подаются в контактные теплообменные аппараты. Выбран окисно-марганцевый способ, относящийся к «сухим» способам очистки. Предложена схема расположения аппаратов по очистке дымовых газов от диоксида серы с использованием контактных теплообменных аппаратов и последующей утилизацией тепла в энергетическом модуле в составе шахтного энергокомплекса. Рассмотрена стадийность основной химической реакции окисно-марганцевого способа. Предложен метод интенсификации этой реакции путём наложения пульсаций на поток дымовых газов, поступающих в аппарат их очистки от диоксида серы.

Ключевые слова: контактный теплообменный аппарат, диоксид серы, марганца оксид, интенсификация, пульсации потока, дымовые газы.

Сокращение выбросов токсичных веществ в атмосферу является одной из важнейших задач современных производств. В числе этих задач очистка отходящих газов от диоксида серы является одной из наиболее актуальных научно-технических проблем, так как с каждым годом загрязнение атмосферы сер-

нистыми соединениями увеличивается. Значительную долю в этот процесс вносят энергетические установки, потребляющие угольное топливо и мазут. В процессе горения сера, входящая в состав топлива, окисляется в оксид серы и вместе с дымовыми газами выбрасывается в атмосферу [1-2].

Решением данной проблемы является утилизация теплоты уходящих газов с предварительной очисткой дымовых газов от сернистых соединений, что позволит существенно повысить экологическую, энергетическую эффективность предприятий, а также улучшить их экономические показатели.

Традиционно тепло дымовых газов используется при работе котлоутилизаторов. Разработаны способы полезной утилизации тепла дымовых газов на основе термодинамических циклов с низкокипящими рабочими веществами [3]. Для утилизации тепла дымовых газов, образующихся при работе шахтных энергетических комплексов, предложена гидропаровая турбина (ГПТ) [4-6]. Действие турбины основано на процессе преобразования тепловой энергии жидкости (воды) в кинетическую энергию вскипающего в адиабатических условиях двухфазного потока. Для обеспечения её работы необходимы теплообменные аппараты по нагреву циркуляционной воды за счёт тепловой энергии дымовых газов.

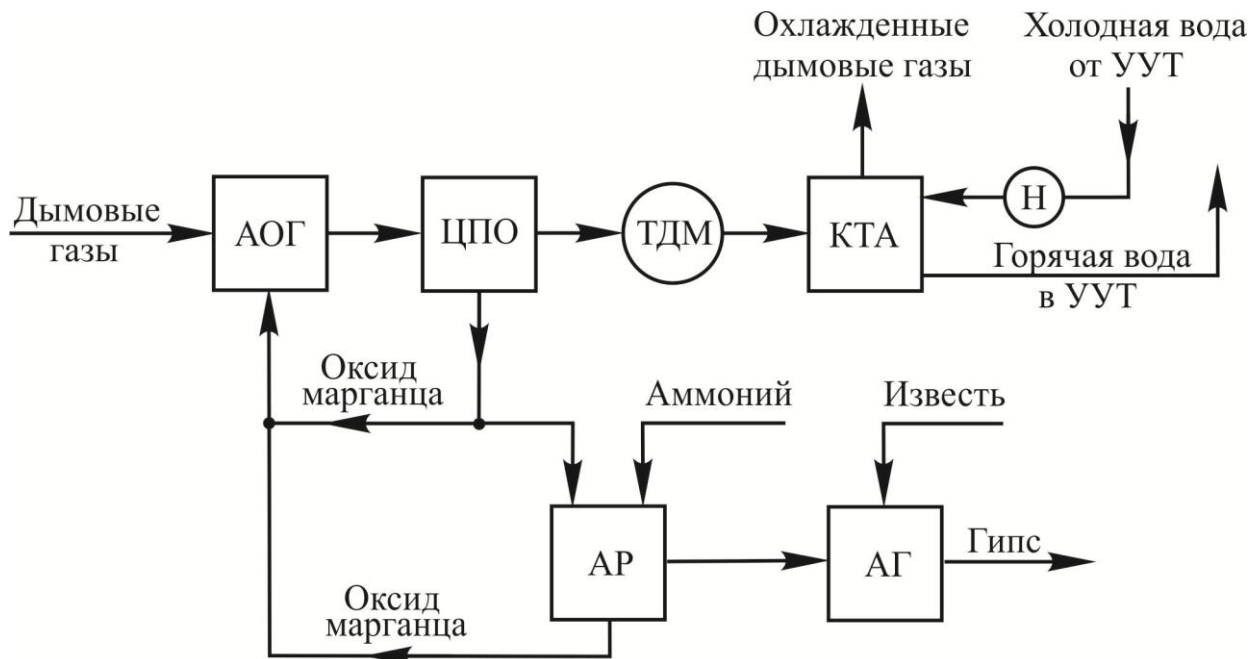
Анализ различных конструкций и принципов работы теплообменных аппаратов показал перспективность применения контактных теплообменных аппаратов для использования тепла дымовых газов [7,8]. С учетом особенностей теплофизических процессов в контактных теплообменных аппаратах (КТА) для передачи тепловой энергии дымовых газов, образующихся при работе шахтных энергетических комплексов, выбраны конструкции аппаратов оросительных форсуночных (АОФ) и аппаратов центробежных теплообменных (АЦТ), которые обладают значительным ресурсом интенсификации теплофизических процессов.

Однако для длительной безремонтной работы КТА необходимо предусмотреть технические решения по очистке дымовых газов от диоксида серы перед их использованием. Проанализировав различные способы очистки дымовых газов от диоксида серы, для использования в аппарате очистки газов (АОГ) принят окисно-марганцевый способ, который относится к «сухим» способам очистки. В решении этого вопроса учитывалось также наличие сырьевой базы в Украине по марганцевой руде.

Целью данной работы является разработка способа интенсификации процесса очистки дымовых газов от диоксида серы окисно-марганцевым способом.

Для этого разработана схема расположения аппаратов, которая предполагает их размещение вдоль двух потоков материальных сред (рис.1). Первый – это поток собственно дымовых газов, по ходу которого происходит их очистка от диоксида серы, выделение прореагировавшего адсорбента (оксид марганца), охлаждение дымовых газов и затем уже их выброс в атмосферу. Второй – это поток оксида марганца, на поверхности которого происходит твердофазная реакция осаждения диоксида серы из дымовых газов. Для придания движения этим потокам комбинированная схема содержит тяго-дутьевую машину. Она осуществляет полное движение газозвеси оксида марганца и частично дымо-

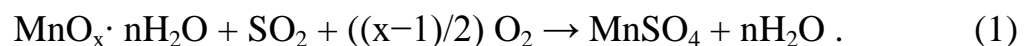
вых газов. В самом контактном теплообменном аппарате в случае использования АОФ движение дымовых газов осуществляется также конвекцией. В случае использования АЦТ этот эффект отсутствует. Для функционирования контактного теплообменного аппарата используется насос подачи на распылители воды, которая была охлаждена в установке утилизации тепла (УУТ). Для вращения теплообменной ячейки АЦТ используется электродвигатель.



АОГ – аппарат очистки газов, ЦПО – центробежный пылеотделитель, ТДМ – тягодутьевая машина, КТА – контактный теплообменный аппарат, АР – аппарат регенерации оксида марганца, АГ – аппарат по выпуску гипса, Н – насос для подачи в распылители холодной воды, которая поступает от УУТ

Рисунок 1 - Схема расположения аппаратов по очистке дымовых газов от диоксида серы

Аппараты, представленные на схеме (рис.1), функционируют следующим образом. Дымовые газы поступают в АОГ, который содержит в насыпном виде порошок оксида марганца с диаметром частиц от 0,8 до 1,3 мм. На поверхности частиц порошка происходит адсорбция SO_2 с последующим превращением поверхностного слоя оксида марганца в сульфат марганца по топомхимической реакции



Таким образом, серосодержащее соединение из газовой среды переводится в твердофазное состояние. Движение потоков обеспечивает тяго-дутьевая машина, установленная после ЦПО. После отделения в ЦПО прореагировавшего адсорбента дымовой газ поступает на охлаждение в КТА. Одна часть адсорбента после ЦПО возвращается сразу же в АОГ. Другая его часть адсорбента направляется в аппарат регенерации. Здесь идет восстановление в поверхностном слое частиц сульфат марганца до оксида марганца по реакции



После аппарата регенерации восстановленный порошок возвращается в АОГ. В аппарате регенерации при восстановлении оксида марганца из сульфата образуется сульфат аммония, который направляется в аппарат по выпуску гипса. В этот же аппарат вводится известь для образования гипса. Таким образом, диоксид серы извлекается из потока дымовых газов и преобразуется в твёрдый товарный продукт. ТДМ подаёт очищенные от диоксида серы дымовые газы в контактный теплообменный аппарат. Через КТА насосом прокачивается холодная вода, которая поступает от УУТ. После нагрева идёт возврат воды в УУТ.

Рассмотрим подробнее стадийность основной химической реакции (1) окисно-марганцевого способа очистки дымовых газов. При попадании дымовых газов в АОГ начинается процесс диффузии газов к поверхности частицы оксида марганца и адсорбции на этой поверхности. Поскольку реакционной способностью к оксиду марганца обладает только диоксид серы в соответствии с топомехимической реакцией (1) около частицы адсорбента формируется некоторое распределение концентрации SO_2 со снижением в направлении к поверхности частицы. Учитывая движение дымовых газов через аппарат, молекулярная диффузия SO_2 сопряжена с конвективной диффузией. Таким образом, около частицы оксида марганца формируется гидродинамический и диффузионный пограничный слой. Известно, что процесс диффузии в нестационарном пограничном слое проходит с большей интенсивностью, чем в стационарных условиях. Поэтому для интенсификации процесса очистки дымовых газов от диоксида серы целесообразно применить подачу пульсирующего потока, которая разработана для процессов сжигания твёрдого топлива [10]. Пульсирующая подача в нашем случае дымовых газов будет формировать нестационарные пограничные слои около частиц оксида марганца, усиливая процесс диффузии диоксида серы к поверхности частиц. В результате интенсификации предварительной стадии реакции (1) сокращается необходимое время для пребывания единицы объёма дымовых газов в АОГ.

Используя опыт, который применялся при совершенствовании процессов переработки твёрдого топлива в пульсирующем кипящем слое [10], для интенсификации процесса очистки дымовых газов от диоксида серы рассмотрим несколько видов применения пульсаций и их реализаций в технологических конструкциях.

Реализация переменной во времени подачи некоторого газа (воздух, дымовые газы) в технологический аппарат осуществляется с помощью пульсатора. Анализ технических средств подачи пульсирующего потока показал, что известные конструкции характеризуются невозможностью регулирования скважности импульсов подаваемого газа, а также конструктивной, технологической сложностью и высоким аэродинамическим сопротивлением. Учитывая вышеперечисленные недостатки, специалистами ИГТМ НАН Украины были разработаны конструкции пульсаторов следующих типов: пульсатор с трехлопастной крыльчаткой [11] (рис. 2), пульсатор со щелевым ротором [12] (рис. 3), диско-

вый пульсатор [13] (рис. 4), учитывающих возможность регулировки скважности потока и формы пульсаций.

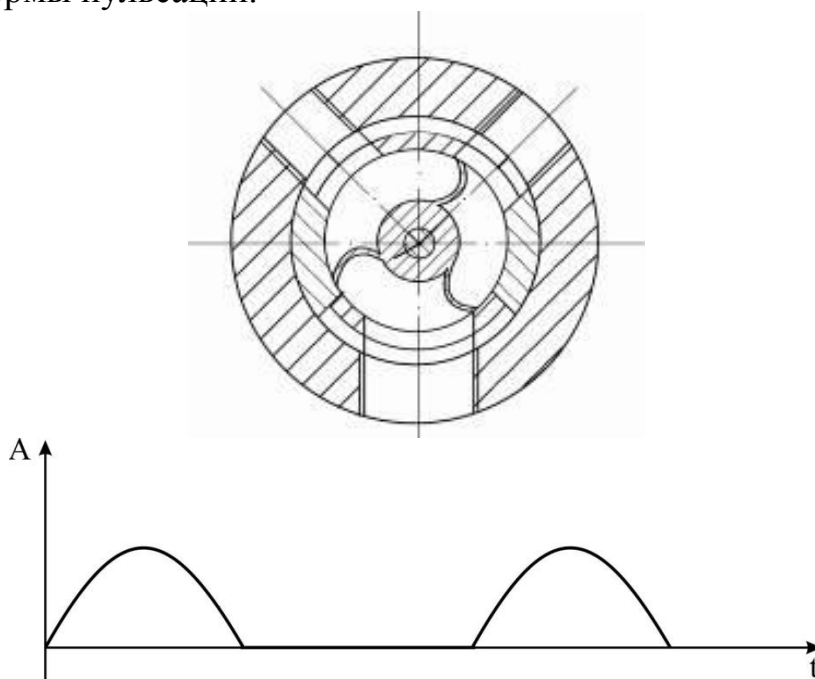


Рисунок 2 - Трехлопастной роторный пульсатор

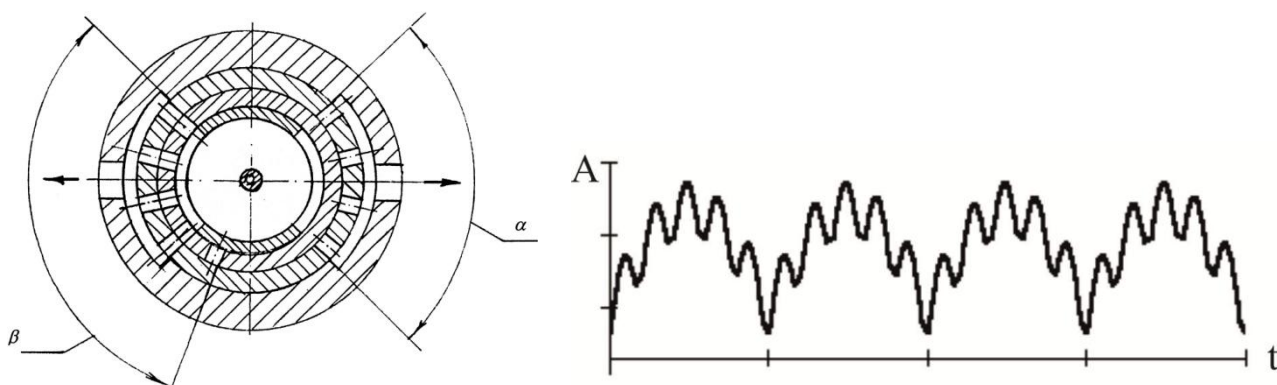


Рисунок 3 - Пульсатор с щелевым ротором

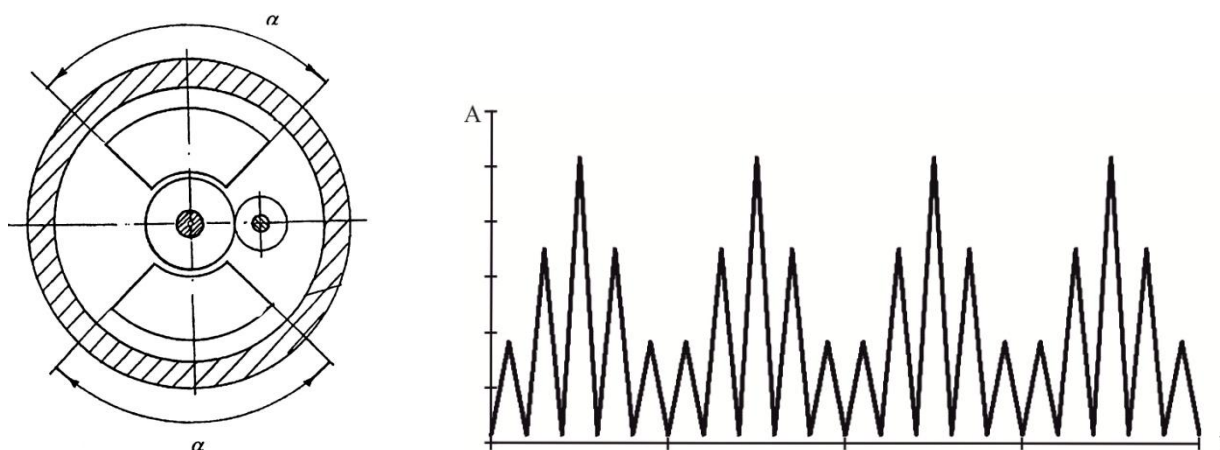


Рисунок 4 - Дискосый пульсатор

Анализ влияния параметров пульсационного воздействия на эффективность процесса очистки дымовых газов удобнее проводить по эмпирической зависимости, рассмотренной в литературе [10]

$$\phi_3(z) = A \cdot [1 - \exp(-B \cdot z)]. \quad (3)$$

Коэффициенты A и B определяются по зависимостям

$$A = 0,64 \cdot \left(\frac{H_0}{d_i}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{-0,09} \cdot Pe^{-0,15} \cdot \psi^{-0,05}, \quad (4)$$

$$B = 966,85 \cdot \left(\frac{H_0}{d_i}\right)^{0,1} \cdot \left(\frac{k_1}{k_2}\right)^{-0,1} \cdot Pe^{-0,65} \cdot \psi^{-0,15}, \quad (5)$$

где ψ - скважность; d_i - диаметр частиц, м; $Pe = u_{cp} \cdot d_i / D$ - критерий Пекле, где u_{cp} - среднеинтегральное значение пульсационной струи, м/с.

На рисунке 5 показаны результаты сравнения расчетных данных для постоянного (пунктирная линия) и пульсирующего режима (сплошная линия).

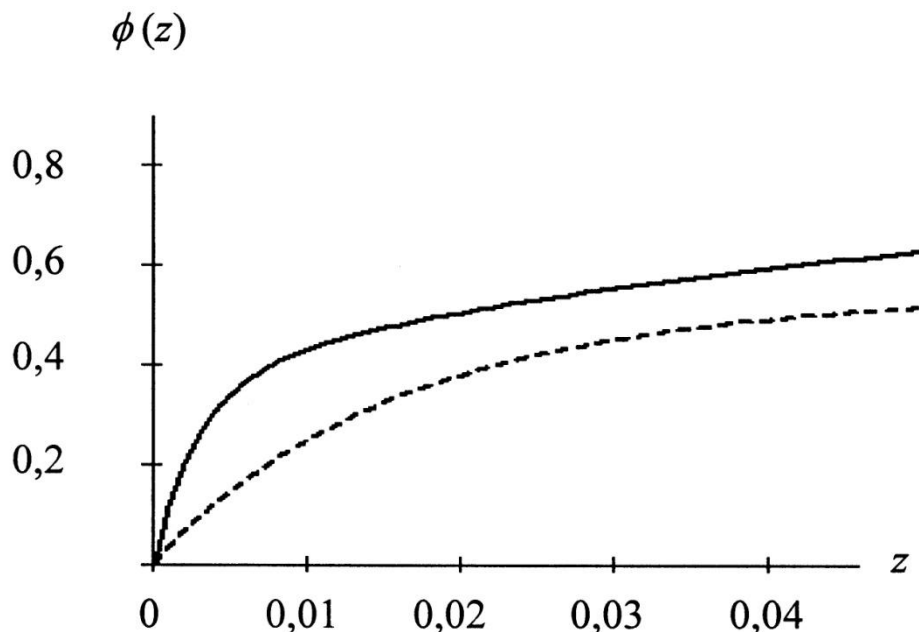


Рисунок 5 - Изменение безразмерной функции $\phi(z)$ от содержания частиц оксида марганца в аппарате очистки газов

Как видно из рисунка, пульсационный режим способствует увеличению безразмерной функции $\phi(z)$. Это объясняется тем, что сообщаемые частицам колебания вызывают их относительное перемещение, вследствие чего диффузионный пограничный слой около частиц приобретает нестационарный характер, что интенсифицирует поверхностные стадии реакции окисно-марганцевого метода.

Выводы. Для решения задачи очистки дымовых газов от диоксида серы выбран окисно-марганцевый способ. Рассмотрены стадии основной реакции окисно-марганцевого способа. Для интенсификации этой реакции предложено использовать пульсирующую подачу дымовых газов в аппарат очистки. Пульсирующая подача дымовых газов формирует нестационарные пограничные слои около частиц оксида марганца, усиливая процесс диффузии диоксида серы к поверхности частиц. Интенсификация этих процессов стимулирует превращение поверхностного слоя оксида марганца в сульфат марганца. Таким образом, сокращается время, необходимое для пребывания единицы объема дымовых газов в аппарате очистки газов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Карп, И.Н. Количественная оценка влияния внедрения энергосберегающих технологий на экологию природного газа в промышленности и энергетике / И.Н.Карп, Е.И. Сухин //Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2007. – №4. – С.24 – 44.
2. Карп, И.Н. К вопросу энергетического баланса металлургического завода / И.Н.Карп, М.И. Губинский, Л.Ю. Назюта // Праці XV міжнародної конференції «Теплотехніка та енергетика в металургії», 7-9 жовтня 2008. – Дніпропетровськ, НМетАУ, 2008 – С.114 – 116.
3. Буляндра, О.Ф. Технічна термодинаміка / О.Ф.Буляндра, – К.: Техніка, 2006. – 320 с.
4. Булат, А.Ф. Научно-технические основы создания шахтных когенерационных энергетических комплексов / А.Ф. Булат, И.Ф. Чемерис. – К.: Наук. думка, 2006. – 176 с.
5. Пат.90232 Украина UA МПК⁹ F01D 1/00. Реактивна турбіна / Булат А.Ф., Чемерис І.Ф.; заяв. та патентовласник Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України – a200906198; заявл.15.06.2009; опубл. 12.04.2010. – Бюл. № 7. – С.3.87.
6. Кирсанов, М.В. Перспективы применения гидропаровой турбины для утилизации избыточной теплоты шахтного энергокомплеса / М.В. Кирсанов, М.В. Губинский //Экотехнологии и ресурсосбережение. – 2013. – №6. – С.99 – 102.
7. Борисов, И.И. Центробежные контакторы: основные типы и практическое применение. Обзор / И.И. Борисов, А.А. Халатов //Промышленная теплотехника и техническая теплофизика. – 2007. – т.29, №2. – С.29 – 34.
8. Picardo, J.R. The Merkel equation revised: A novel method to compute the packed height cooling tower / J.R. Picardo, J.E. Variyar. // Energy Conversation and Management. – 2012. – v. 57. – pp. 160–172.
9. Jing-Jing, Jing. Experemental and numerical analysis of a cross-flow closed wet cooling tower / Jing-Jing Jing, Xiao-Hua Lin, Yi Jing // Applied Thermal Engineering.– 2013. – v. 61.– pp.678–689.
10. Дякун, І.Л. Повышение эффективности энергетической переработки угля / И.Л. Дякун – Киев: Наук.думка, 2014. – 128с.
11. Пат. 66646А Україна, (51) МПК 7 G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л. (Дякун І.Л.); заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 2003087753; заявл. 15.08.2003; опубл. 17.05.2004, Бюл. № 5.
12. Пат. 4855 Україна, (51) МПК 7 G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л. (Дякун І.Л.); заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 20040503291; заявл. 05.05.2004; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.
13. Пат. 7783 Україна, (51) МПК 7 G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л. (Дякун І.Л.); заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 20041108903; заявл. 01.11.2004; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.

REFERENCES

1. Karp, I.N. and Sukhin, E.I. (2007), “Quantitative estimation of the impact of the introduction of energy saving technologies in the natural gas savings in industry and energy”, *Ekotekhnologii i resususberzhenie*, no.4, pp.24 – 44.

2. Karp, I.N, Gubinskiy, V.I. and Nazyuta, N.Y. (2008), "On the issue of the energy balance of metallurgical plant", *Pratsi XV mizhnarodnoy konferentsiy "Teplotekhnika ta energetika v metalurgii"* [Proceedings of the XV International Conference "Heat and power in the industry"], *Mizhnarodna konferentsiya "Teplotekhnika ta energetika v metalurgii"* [The XV International Conference "Heat and Power in the Industry"], Dnipropetrovsk, Ukraine, 7-9 October 2008, pp.114 – 116.
3. Bulyandra, O.F., (2006), *Tekhnichna thermodynamika* [Technical thermodynamics], Tekhnika, Kiev, Ukraine.
4. Bulat, A.F. and Chemeris, I.F. (2006), *Nauchno-tekhnicheosky osnovy sozdania shakhtnykh kogeneratsionnykh energetycheskikh kompleksov* [Scientific and technical basis for the creation of mine co-generation energy systems], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
5. Bulat, A.F., Chemeris, I.F., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (2010), *Reaktyvna turbina* [Jet turbine], State Register of Patent of Ukraine, Kiev, UA, Pat.90232.
6. Kirsanov, M.V. and Gubinskiy, M.V.(2013), "Prospects for the use of hydro-steam turbine for utilization of excess heat energy mine complexes", *Metallurgical and Mining Industry*, no.6, pp.99 – 102.
7. Borisov, I.I. and Khalatov, A.A. (2007), "Centrifugal contactors: main types and applications. Overview", *Promyshlennaya teplotekhnika i tekhnicheskaya teplofizika*, vol. 29, no. 2, pp.29 – 34.
8. Picardo, J.R. (2013), "The Merkel equation revised: A novel method to compute the packed height cooling tower", *Energy Conversation and Management*, vol. 57, pp. 160–172.
9. Jing-Jing Jing, Jing-Jing Jing, Xiao-Hua Lin and Yi Jing (2013), "Experimental and numerical analysis of a cross-flow closed wet cooling tower", *Applied Thermal Engineeri*, vol. 61, pp.678–689.
10. Dyakun, I.L. (2014), *Povyshenie effektivnosti energetycheskoy pererabotki uglya* [Improving the efficiency of energy coal processing], Naukova dumka, Kiev, Ukraine.
11. Chemeris, I.F., Bulat, A.F., Voziyanov, V.S., Slobodyannikova, I.L. (Dyakun, I.L.), M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2003), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchykh povitryanykh potokiv u toptsi z kipliyachym sharom* [A device for creating pulsating air currents in the furnace of the fluidized bed], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 66646A.
12. Chemeris, I.F., Bulat, A.F., Voziyanov, V.S., Slobodyannikova, I.L. (Dyakun, I.L.), M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2004), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchykh povitryanykh potokiv u toptsi z kipliyachym sharom* [A device for creating pulsating air currents in the furnace of the fluidized bed], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 4855.
13. Chemeris, I.F., Bulat, A.F., Voziyanov, V.S., Slobodyannikova, I.L. (Dyakun, I.L.), M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2004), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchykh povitryanykh potokiv u toptsi z kipliyachym sharom* [A device for creating pulsating air currents in the furnace of the fluidized bed], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 7783.

Об авторах

Дякун Інна Леонидовна, кандидат технічних наук, молодший научний співробітник відділу проблем шахтних енергетических комплексів, Інститут геотехніческої механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпр, Україна, dyakun@ukr.net.

Кирсанов Михайл Владимирович, магістр, головний конструктор проекту відділу проблем шахтних енергетических комплексів, Інститут геотехніческої механіки ім. Н.С. Полякова Національної академії наук України (ІГТМ НАНУ), Дніпр, Україна, mvkir@googl.com.

About the authors

Dyakun Inna Leonidovna, Candidate of Technical Science (Ph. D.), Junior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, dyakun@ukr.net

Kirsanov Mikhail Vladimirovich, Master of Science (M.S.), Chief Designer in Department of Mine Energy Complexes, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, mvkir@googl.com

Анотація. У статті запропоновано метод інтенсифікації процесу очищення димових газів від сірчистих сполук для використання в теплообмінних апаратах, який дозволить підвищити екологічну, енергетичну ефективність підприємств, а також поліпшити їх економічні показники. Розглянуто способи та обладнання для корисної утилізації тепла димових газів. Обгру-

нтовано необхідність застосування контактних теплообмінних апаратів у складі шахтних енергетичних комплексів і обрано раціональні варіанти їх конструкцій. Для забезпечення роботи даного обладнання в складі шахтних енергетичних комплексів обґрунтовано необхідність застосування контактних теплообмінних апаратів. На основі аналізу особливостей теплофізичних процесів в контактних теплообмінних апаратах рекомендовано конструкції зрешувальних форсуночних і відцентрових теплообмінних апаратів. Контактні теплообмінні апарати цих конструкцій мають значний ресурс інтенсифікації теплофізичних процесів. Розглянуто різні способи очищення від діоксиду сірки димових газів, що подаються до контактних теплообмінних апаратів. Обрано окисно-марганцевий спосіб, що відноситься до «сухих» способів очищення. Запропоновано схему розташування апаратів з очищення димових газів від діоксиду сірки з використанням контактних теплообмінних апаратів і подальшою утилізацією тепла в енергетичному модулі у складі шахтного енергокомплексу. Розглянуто стадійність основної хімічної реакції окисно-марганцевого способу. Запропоновано метод інтенсифікації цієї реакції шляхом накладання пульсацій на потік димових газів, що надходять в апарат їх очищення.

Ключові слова: контактній теплообмінний апарат, діоксид сірки, оксид марганцю, інтенсифікація, пульсації потоку, димові газу.

Abstract. This paper proposes a method for intensifying the flue-gas cleaning from sulfur compounds in order to use it in heat exchangers and to improve environmental and energy efficiency and economic performance of the coal-producing enterprises. Different methods and equipment were considered for beneficial use of flue-gases heat. To ensure operation of such equipment in the mine's energy complex, it is necessary to use contact heat exchangers. Basing on analysis of peculiar thermophysical processes in the contact heat exchangers, it is recommended to use designs with spray-type devices and centrifugal heat exchangers. The contact heat exchangers of such design have significant resource for intensifying the thermal processes. Different methods are discussed for cleaning the flue gases from sulfur dioxide and feeding them to the contact heat exchangers. An oxide-manganese method was chosen, as it is related to the "dry" method of the flue-gas cleaning. A layout scheme is proposed for devices for flue-gases cleaning from sulfur dioxide and their usage in contact heat exchangers in order to supply heat to the energy unit in the mine's energy complex. The stages of main chemical reaction of the oxide-manganese method is considered. In order to intensify this reaction, it is proposed to apply pulsation to the flue-gas flows entering the apparatus of their cleaning from sulfur dioxide.

Keywords: contact heat exchangers, sulfur dioxide, manganese oxide, intensification, flow pulsations, flue gases.

Статья поступила в редакцию 12.10.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Семененко Е.В.