

УДК 621.928

Сергей Ильич Шувалов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Геннадий Григорьевич Михеев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Павел Геннадьевич Михеев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Схемы приготовления дробленого угля для сжигания в котлах с кипящим слоем с использованием гравитационного сепаратора

Авторское резюме

Состояние вопроса. Низкая концентрация оксидов азота при сжигании углей в топках с кипящим слоем обусловлена ограничением доли первичного воздуха в зоне горения. Применяемые схемы подготовки дробленого угля ориентированы исключительно на применение грохотов с фиксированным максимальным размером частиц в смеси. Расход первичного воздуха ограничивается условиями псевдооживления слоя и может быть снижен только при уменьшении размера подаваемых в топку частиц. При неизменном размере частиц и пониженных нагрузках котла доля первичного воздуха и вместе с ней концентрация оксидов азота в дымовых газах увеличиваются. Применение сепараторов для оперативного изменения размеров частиц до сих пор не рассматривалось, так как априори предполагалось, что сепараторы не могут обеспечить требуемый дисперсный состав дробленого угля.

Материалы и методы. Для оценки возможности применения сепараторов в схемах подготовки дробленого угля к сжиганию в кипящем слое и определения необходимых границ разделения проведены варианты расчетов применительно к схеме подготовки угля для котла № 9 Новочеркасской ГРЭС.

Результаты. Показано, что дисперсный состав мелкого продукта разделения в гравитационном сепараторе с пересыпными полками по границе 5 мм идентичен дисперсному составу дробленого угля, полученного в схеме с грохотом и дробилкой. Приведена зависимость максимального размера частиц дробленого угля от границы разделения сепаратора.

Выводы. Показано, что в схеме приготовления дробленого угля для сжигания в кипящем слое замена грохотов на гравитационные сепараторы не приведет к нарушению требований, предъявляемых к дисперсному составу дробленого угля. При этом предлагаемая замена позволяет оперативно в процессе эксплуатации изменять максимальный размер частиц дробленого угля и за счет этого поддерживать оптимальную долю первичного воздуха при изменении нагрузки котла.

Ключевые слова: оксиды азота, первичный воздух, грохот, дробилка, гравитационный сепаратор, дисперсный состав дробленого угля

Sergei Ilyich Shuvalov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Gennady Grigorievich Mikheev

Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Pavel Gennadievich Mikheev

Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Preparation schemes of crushed coal for combustion in fluidized bed boilers using a gravity separator

Abstract

Background. The low concentration of nitrogen oxide during coal combustion in fluidized bed furnaces is due to the limited proportion of primary air in the combustion zone. The schemes applied for the preparation of crushed coal are mostly for the use of coal breakage screens with a fixed maximum particle size in the mixture. The primary air flow is limited to the conditions of the fluidization of the bed and can be reduced only by reducing the size of the particles fed into the furnace. With a constant particle size and lower boiler loads, the proportion of primary air and thus the concentration of nitrogen oxides in the flue gas increase. The use of separators to change the particle size has never been considered, since it is a priori assumed that the separators cannot provide the required disperse composition of crushed coal.

Materials and methods. To assess the possibility of using separators in the schemes of preparing crushed coal for combustion in a fluidized bed and to determine the necessary separation boundaries, variants calculations were carried out in respect to the coal preparation scheme for boiler No. 9 of the Novocherkasskaya hydro-power plant.

Results. It is shown that the disperse composition of the fine separation product in the gravity separator with overturning shelves along the 5 mm boundary is identical to the disperse composition of crushed coal obtained in the scheme with a screen and crusher. The dependence of the maximum particle size of crushed coal on the separation boundary of the separator is given.

Conclusions. It is shown that in the scheme of preparation of crushed coal for combustion in a fluidized bed, replacement of screens with gravity separators will not lead to violation of the requirements for the dispersed composition of crushed coal. At the same time, the proposed replacement allows you to quickly change the maximum particle size of crushed coal during operational activity and thereby to maintain the optimal fraction of primary air when the boiler load changes.

Key words: nitrogen oxide, primary air, screen, crusher, gravity separator, disperse composition of crushed coal

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.1.014-020

Введение. Сжигание углей в кипящем слое относится к экологически чистым технологиям, позволяющим значительно сократить выбросы вредных веществ в окружающую среду без применения дорогостоящих установок серо- и азотоочистки [1]. Дополнительным преимуществом технологии сжигания углей в кипящем слое перед факельным сжиганием считается отсутствие необходимости тонкого измельчения углей, позволяющее сократить затраты на пылеприготовление.

Вместе с тем к дисперсному составу сжигаемого топлива также предъявляются специфические требования [2–4]: для устойчивого состояния кипящего слоя размеры частиц слоя должны находиться преимущественно внутри диапазона $\delta_{\min} \leq \delta \leq \delta_{\max}$, где в зависимости от марки угля и конструктивных особенностей топочной камеры $\delta_{\max} = 2\text{--}6$ мм.

Поставляемый на ТЭС уголь представляет собой полидисперсную смесь частиц, размеры которых значительно выходят за указанные пределы, поэтому для котлов с топками кипящего слоя должна

быть организована система топливоприготовления с установками измельчения и классификации.

В топочную камеру воздух подается двумя или тремя потоками: в нижнюю часть камеры – для псевдооживления слоя (первичный воздух); в середину слоя (вторичный воздух); в надслоевое пространство (третичный воздух) – для обеспечения выгорания частиц топлива. Ступенчатая подача воздуха позволяет создать в зоне горения восстановительную среду, способствующую сокращению образования оксидов азота в дымовых газах.

Доля первичного воздуха составляет $\alpha_1 = 0,5\text{--}0,8$ и зависит от толщины слоя и размера наиболее крупных частиц топлива. В [5] показано, что уменьшение доли первичного воздуха вплоть до $\alpha_1 = 0,5$ приводит к снижению концентрации NO_x в дымовых газах для любых марок углей, поэтому наиболее экологичный режим работы достигается при минимально низком расходе первичного воздуха, обеспечивающем псевдооживление слоя.

Наиболее крупным котлом с кипящим слоем на российских ТЭС является котел энергоблока №9 Новочеркасской ГРЭС, введенный в эксплуатацию в 2017 году [6]. При его создании использовались современные технологии подготовки и организации сжигания топлива в кипящем слое, поэтому в качестве базового варианта для анализа схем приготовления дробленого угля была выбрана схема топливоподачи Новочеркасской ГРЭС.

На тракте топливоподачи Новочеркасской ГРЭС для блока № 9 с котлом ЦКС организован узел подготовки дробленого угля по схеме, показанной на рис. 1.

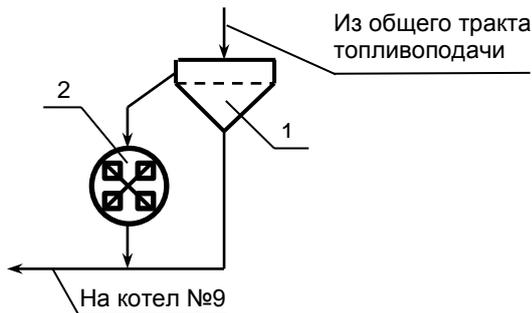


Рис. 1. Принятая схема подготовки дробленого угля: 1 – грохот с ячейками 6 мм; 2 – дробилка

После вагоноопрокидывателя и двухвалковой дисковой дробилки ДДЗ-500 уголь проходит валковый грохот с ячейками $\delta_{гр,0} = 50$ мм. Выделенные частицы размера 0–50 мм поступают в тракт подготовки дробленого угля блока №9. Дисперсный состав угля, поступающего на узел подготовки дробленого угля, представлен на рис. 2.

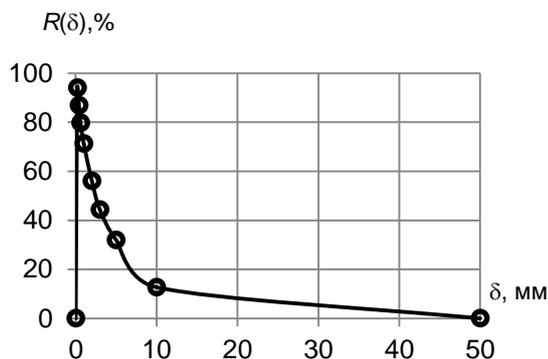


Рис. 2. Дисперсный состав угля перед узлом подготовки дробленого угля

С ленточного транспортера уголь подается на сетку шнекового грохота ГШ-250 с ячейками сетки 6,3 мм. Надрешетный продукт, т.е. частицы крупнее 6,3 мм, пода-

ется в молотковую дробилку. Размолотые в дробилке частицы смешиваются с прошедшими через сетку грохота частицами и подаются на сжигание. Дисперсный состав дробленого угля после узла подготовки представлен на рис. 3.

В смеси частиц перед котлом присутствует около 7 % частиц крупнее 6 мм и 15 % частиц мельче 200 мм.



Рис. 3. Дисперсный состав дробленого угля перед котлом

Используемая схема подготовки дробленого угля для котла с кипящим слоем проста и компактна, но она обладает принципиальным недостатком: максимальный размер частиц угля, подаваемого в котел, остается неизменным независимо от его нагрузки. Если для поддержания кипящего слоя при номинальной нагрузке доля первичного воздуха должна быть не ниже $\alpha_1 = 0,7$, то при снижении нагрузки до 70 % и постоянном расходе воздуха на псевдоожигание слоя эта доля составит $\alpha_1 = 1$, что приведет к исчезновению восстановительной среды в зоне горения и повышению концентрации NO_x в дымовых газах. Для подавления концентрации оксидов азота должна быть обеспечена возможность снижения расхода первичного воздуха вместе с нагрузкой котла.

Методы исследования. Уменьшение расхода воздуха, направляемого на псевдоожигание слоя, возможно при снижении максимального размера частиц дробленого угля. Для этого предлагается схема подготовки дробленки, показанная на рис. 4.

Грохот с фиксированными размерами ячеек сети заменяется на воздушно-проходной сепаратор, позволяющий целенаправленно изменять границу разделения и вместе с ней максимальный размер частиц мелкого продукта. Принципиальным при этом является вопрос о дисперсном составе мелкого продукта и границе разделения сепаратора.

Разделение частиц по крупности на два класса обладает свойствами случайного процесса, в котором вероятность попадания в мелкий продукт разделения частиц любого размера может быть очень малой, но не нулевой. Для определенности за максимальный размер частиц в смеси δ_{\max} будем считать такой размер, для которого доля более крупных частиц в смеси составляет 5 %.

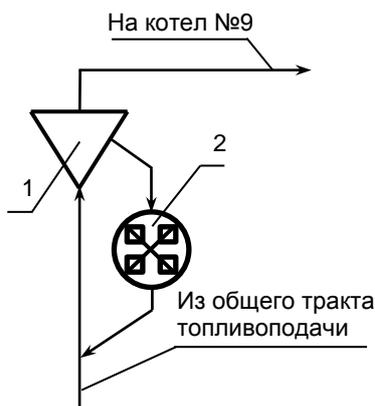


Рис. 4. Предлагаемая схема подготовки дробленого угля: 1 – гравитационный сепаратор; 2 – дробилка

Обозначим через $\varphi_{\delta}(\delta)$ вероятность попадания частицы размером δ в мелкий продукт разделения. Тогда вероятность попадания этой частицы в крупный продукт разделения составит $1 - \varphi_{\delta}(\delta)$. Зависимость $\varphi_{\delta}(\delta) = f(\delta)$ называется кривой разделения или кривой Тромпа [7–9]. С ее помощью при известном дисперсном составе материала перед сепаратором $R_1(\delta)$ рассчитывается доля выделенного в мелкий продукт материала:

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{100} \int_0^{100} \varphi_{\delta}(\xi) dR_1(\xi), \quad (1)$$

где ξ – текущий размер частиц.

При заданном расходе материала в сепаратор B_1 расходы и дисперсные составы продуктов разделения определяются по формулам:

$$B_{\text{мел}} = B_1 \bar{\varphi}; \quad (2)$$

$$B_{\text{кр}} = B_1 (1 - \bar{\varphi}); \quad (3)$$

$$R_{\text{мел}}(\delta) = \frac{1}{\bar{\varphi}} \int_0^{R_1(\delta)} \varphi_{\delta}(\xi) dR_1(\xi); \quad (4)$$

$$R_{\text{кр}}(\delta) = \frac{1}{1 - \bar{\varphi}} \int_0^{R_1(\delta)} [1 - \varphi_{\delta}(\xi)] dR_1(\xi). \quad (5)$$

Кривая $\varphi_{\delta}(\delta)$ определяется по экспериментальным данным [10] и зависит от

конструкции сепаратора и настройки режима его работы. Для проведения прогностических расчетов эта кривая может быть аппроксимирована формулой Плитта [11, 12] с двумя параметрами, которые обеспечивают согласование опытных и расчетных значений:

$$\varphi_{\delta}(\delta) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\delta}{\delta_{\text{гр}}}\right)^{ks}}. \quad (6)$$

Граничный размер разделения $\delta_{\text{гр}}$ определяется из условия $\varphi_{\delta}(\delta_{\text{гр}}) = 0,5$ и соответствует размеру частиц, имеющих равную вероятность попадания в мелкий и крупный продукты разделения. Этот параметр является управляемым. Предполагается, что за счет целенаправленного изменения режима работы можно обеспечить разделение поступающего в сепаратор материала по любой границе в пределах регулировочного диапазона сепаратора.

Параметр ks учитывает неидеальность разделения реального сепаратора, при которой в мелкий продукт попадают частицы крупнее граничного размера, а в крупный продукт – более мелкие. Он зависит в основном от конструкции сепаратора и оценивает ее совершенство. Для гравитационного сепаратора с пересыпными полками можно принять $ks \approx 2,3$ [13].

Результаты исследования. По уравнениям (1)–(6) был проведен расчет разделения подаваемых в сепаратор частиц угля с дисперсным составом, соответствующим рис. 2, по границам $\delta_{\text{гр},1} = 5$ мм, $\delta_{\text{гр},2} = 3$ мм, $\delta_{\text{гр},3} = 1$ мм. Дисперсные составы мелких продуктов разделения показаны на рис. 5.

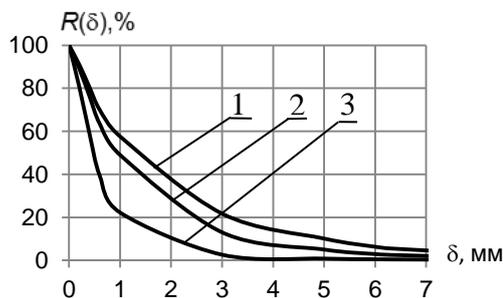


Рис. 5. Дисперсный состав дробленого угля при различных границах разделения: 1 – $\delta_{\text{гр}} = 5$ мм; 2 – $\delta_{\text{гр}} = 3$ мм; 3 – $\delta_{\text{гр}} = 1$ мм

При разделении по границе $\delta_{\text{гр},1} = 5$ мм (кривая 1) дисперсный состав продукта разделения близок к дисперсному составу

подрешеточного продукта после грохота. Остаток на сите 6,3 мм после грохота составил 5,7 % и после сепаратора 5,5 %, на сите 1,6 мм – соответственно 39,3 и 43,8 %. При этом доля выноса мелкого (готового) продукта из сепаратора составляет $\bar{\varphi}_1 = 0,67$, что близко к предельной величине $\bar{\varphi}_{\text{теор}} = 0,73$. Поток крупных частиц на дробилку составит $1 - \bar{\varphi}_1 = 0,33$ от общего расхода на узел подготовки дробленого угля.

Таким образом, по эффективности разделения гравитационный классификатор для принятой границы разделения вполне может заменить грохот с фиксированными размерами ячеек.

Снижение границы разделения приводит к получению более мелкого целевого продукта и, соответственно, к уменьшению доли выноса: при $\delta_{\text{гр},2} = 3$ мм содержание в мелком продукте частиц крупнее 6,3 мм уменьшается до 2,5 %, а полный вынос становится равным $\bar{\varphi}_2 = 0,55$.

При разделении по границе $\delta_{\text{гр},3} = 1$ мм доля частиц в мелком продукте крупнее 6,3 мм составит 0,4 %, что означает их полное исчезновение из смеси частиц. Доля частиц крупнее 3 мм будет равна 2,6 %, крупнее 2 мм – 7 %.

На рис. 6 приведена зависимость максимального размера частиц в мелком продукте сепаратора от граничного размера разделения.



Рис. 6. Зависимость максимального размера частиц от границы разделения

Для обеспечения $\delta_{\text{max}} = 6$ мм необходимо поступающий с тракта топливоподачи уголь разделять по границе $\delta_{\text{гр}} = 4,3$ мм, для $\delta_{\text{max}} = 4$ мм граница разделения должна быть равной $\delta_{\text{гр}} = 2,2$ мм. Следует отметить, что указанные значения соответствуют представленному на рис. 2 дисперсному составу подаваемого в сепаратор матери-

ала. При другой крупности исходного материала границы и выносы будут другими.

Для организации разделения частиц в сепараторе общая схема, показанная на рис. 4, должна быть обеспечена дополнительными элементами: циклоном, вентилятором, транспортным устройством для подачи измельченного материала в сепаратор, регулирующими органами. Рекомендуемая технологическая линия подготовки дробленого угля представлена на рис. 7.

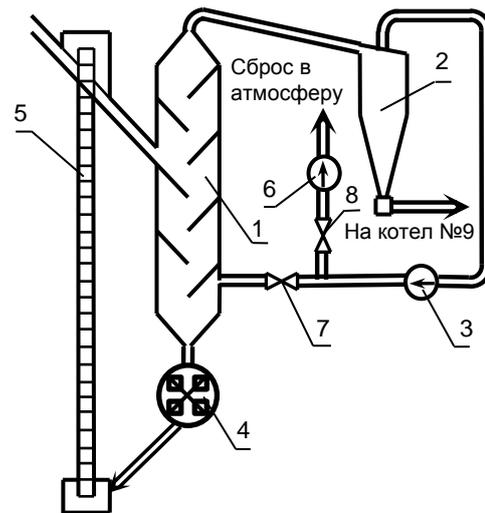


Рис. 7. Технологическая схема подготовки дробленого угля с гравитационным сепаратором: 1 – гравитационный сепаратор; 2 – циклон; 3 – основной вентилятор; 4 – дробилка; 5 – ковшовый транспортер; 6 – сбросной вентилятор; 7 – шибер регулирования границы разделения; 8 – шибер регулирования сброса

Основной частью схемы (рис. 7) является гравитационный сепаратор с пересыпными полками 1 конструкции М.Д. Барского [10]. Особенность этого сепаратора состоит в том, что перерабатываемый материал подается в середину сепаратора самотеком под действием силы тяжести. Поток воздуха, предназначенного для организации процесса классификации частиц по размерам, подводится в нижнюю часть сепаратора. При обтекании полок потоком воздуха в пространстве между полками формируется каскад вихрей с горизонтальными осями вращения, в которых происходит процесс классификации. Более мелкие частицы под преобладающим действием силы аэродинамического сопротивления поднимаются потоком вверх, выходят из сепаратора вместе с воздухом и попадают в циклон 2 для обес-

пыливания. Отделенный от частиц воздух вентилятором 3 направляется снова в сепаратор 1. Осажденные в циклоне частицы направляются в котел или на склад дробленого угля.

Более крупные частицы под преобладающим действием силы тяжести опускаются в нижнюю часть сепаратора и попадают в установленную под сепаратором дробилку 4. Для возврата измельченных в дробилке частиц в расположенное выше загрузочное устройство используется ковшовый транспорт 5.

Для исключения выброса пыли в помещение узла подготовки дробленого угля целесообразно организовать работу воздушного кольца сепаратор–циклон–вентилятор–сепаратор при давлении ниже атмосферного (под разрежением). Для этого на участке вентилятор–сепаратор устанавливается сбросная линия с собственным сбросным вентилятором 6.

Регулирование границы разделения производится изменением расхода воздуха через сепаратор за счет изменения положения регулирующего шиберы 7. Расход сбросного воздуха из кольца выбирается при наладке системы изменением положения шиберы 8.

Выводы. Проведенные расчеты показали, что дисперсный состав мелкого продукта гравитационного сепаратора, настроенного на границу разделения $\delta_{гр} = 5$ мм соответствует дисперсному составу поступающего на котел № 9 дробленого угля. Это означает, что в схемах приготовления дробленого угля для сжигания в кипящем слое замена грохотов на гравитационные сепараторы не приведет к нарушению требований, предъявляемых к дисперсному составу дробленого угля.

Для практического применения предлагаемой схемы в нее должно быть добавлено дополнительное оборудование: основной и сбросной вентиляторы, циклон и ковшовый транспортер. Усложнение схемы приведет к некоторому увеличению капитальных затрат и расхода электроэнергии на собственные нужды. Однако при этом появится возможность целенаправленно и оперативно изменять максимальный размер частиц дробленого угля только за счет изменения расхода воздуха через сепаратор. Для получения дробленого угля с максимальным размером частиц $\delta_{max} = 4$ мм сепаратор должен быть настро-

ен на границу разделения $\delta_{гр} = 2,2$ мм, для обеспечения $\delta_{max} = 3$ мм граница разделения должна быть снижена до $\delta_{гр} = 1,5$ мм. Управление максимальным размером частиц в слое позволит поддерживать оптимальный расход первичного воздуха и низкий уровень оксидов азота при пониженных нагрузках котла.

На Новочеркасской ГРЭС наряду с котлом № 9, сжигающим дробленый уголь, находятся в эксплуатации несколько пылеугольных котлов, оснащенных системами пылеприготовления с шаровыми барабанными мельницами. Применительно к конкретным условиям из схемы подготовки дробленого угля могут быть исключены дробилки, а крупные частицы (надрешеточный продукт грохота или крупный продукт гравитационного сепаратора) после узла классификации направлен на пылесистемы пылеугольных котлов.

Список литературы

1. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.Н. Экологические угольные энерготехнологии. – Киев: Наукова думка, 2004. – 189 с.
2. Баскаков А.П., Мацнев В.В., Распопов И.К. Котлы и топки с кипящим слоем. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 351 с.
3. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 349 с.
4. Гельперин Н.И., Айнштейн В.Г., Кваша В.Б. Основы техники псевдоожижения. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
5. Лекомцева Ю.Г., Баскаков А.П., Мунц В.А. Образование и подавление NO_x и N_2O в топках циркуляционного кипящего слоя // Теплоэнергетика. – 1993. – № 1. – С. 75–78.
6. Опыт освоения современных котельных установок российского производства / А.Н. Тугов, Г.А. Рябов, А.В. Штегман, М.Н. Майданник // Проблемы энергетики. – 2018. – Т. 20, № 7–8. – С. 87–98.
7. Tromp K.F. Neue Wege für die Beurteilung der Aufbereitung von Steinkohlen // Glückauf. – 1937. – Bd 73, № 6. – S. 125–131.
8. Ушаков С.Г., Зверев Н.И. Инерционная сепарация пыли. – М.: Энергия, 1974. – 169 с.
9. Барский М.Д. Фракционирование порошков. – М.: Недра, 1980. – 327 с.
10. Муромкин Ю.Н., Ушаков С.Г. Алгоритмы построения кривой разделения процессов классификации // Известия вузов. Химия и хим. технология. – 1977. – Т. 20, № 4. – С. 604–605.

11. Plitt L.R. The analysis of solid-solid separations in classifiers // *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*. – 1971. – № 4. – P. 42–47.

12. Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Жуков В.П. Обоснование выбора зависимости, используемой для аппроксимации кривой разделения trompa // *Вестник ИГЭУ*. – 2018. – Вып. 6. – С. 15–23.

13. Шувалов С.И. Получение тонкодисперсных порошков в системах пылеприготовления с аэродинамическими классификаторами // *Химическая промышленность*. – 1992. – № 8. – С. 499–503.

References

1. Korchevoy, Yu.P., Maystrenko, A.Yu., Topal, A.N. *Ekologicheskie ugol'nye energo-tekhnologii* [Environmental coal energy technologies]. Kiev: Naukova Dumka, 2004. 189 p.

2. Baskakov, A.P., Matsnev, V.V., Raspopov, I.K. *Kotly i topki s kipyashchim sloem* [Fluidized bed boilers and furnaces]. Moscow: Energoatomizdat, 1995. 351 p.

3. Mukhlenov, I.P., Sazhin, B.S., Frolov, V.F. *Raschety apparatov kipyashchego sloya* [Calculations of fluidized bed apparatus]. Leningrad: Khimiya, 1986. 349 p.

4. Gel'perin, N.I., Aynshteyn, V.G., Kvasha, V.B. *Osnovy tekhniki psevdoozhizheniya* [Basics of fluidization technique]. Moscow: Khimiya, 1967. 664 p.

5. Lekomtseva, Yu.G., Baskakov, A.P., Munts, V.A. *Obrazovanie i podavlenie NO_x i N₂O v topkakh tsirkulyatsionnogo kipyashchego sloya* [Formation and suppression of NO_x and N₂O in the furnaces of a circulating fluidized bed]. *Teploenergetika*, 1993, no. 1, pp. 75–78.

6. Tugov, A.N., Ryabov, G.A., Shtegman, A.V., Maydanik, M.N. *Opyt osvoeniya sovremennykh kotel'nykh ustanovok rossiyskogo proizvodstva* [Experience in the development of modern Russian-made boiler plants]. *Problemy energetiki*, 2018, vol. 20, no. 7–8, pp. 87–98.

7. Tromp, K.F. *Neue Wege für die Beurteilung der Aufbereitung von Steinkohlen*. *Glückauf*, 1937, vol. 73, no. 6, pp. 125–131.

8. Ushakov, S.G., Zverev, N.I. *Inertsionnaya separatsiya pyli* [Inertial dust separation]. Moscow: Energiya, 1974. 169 p.

9. Barskiy, M.D. *Fraktsionirovanie poroshkov* [Fractionation of powders]. Moscow: Nedra, 1980. 327 p.

10. Muromkin, Yu.N., Ushakov, S.G. *Algoritmy postroeniya krivoy razdeleniya protsessov klassifikatsii* [Algorithms for constructing a curve for the separation of classification processes]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khim. tekhnologiya*, 1977, vol. 20, no. 4, pp. 604–605.

11. Plitt, L.R. The analysis of solid-solid separations in classifiers. *The Canadian Mining and Metallurgical Bulletin*, 1971, no. 4, pp. 42–47.

12. Shuvalov, S.I., Novosel'tseva, S.S., Zhukov, V.P. *Obosnovanie vybora zavisimosti, ispol'zuemoy dlya approksimatsii krivoy razdeleniya trompa* [Substantiation of the choice of the dependence used to approximate the thrombus separation curve]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 15–23.

13. Shuvalov, S.I. *Poluchenie tonkodispersnykh poroshkov v sistemakh pyleprigotovleniya s aerodinamicheskimi klassifikatorami* [Obtaining fine powders in dust preparation systems with aerodynamic classifiers]. *Khimicheskaya promyshlennost'*, 1992, no. 8, pp. 499–503.