

ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

RECYCLING OF MAN-MADE MINERAL FORMATIONS AND WASTE

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 622.79

DOI: 10.18503/1995-2732-2022-20-4-26-36



СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ УГОЛЬНЫХ ФЛОТАЦИОННЫХ КОНЦЕНТРАТОВ

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Хамзина Т.А.

Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия

Аннотация. Настоящий обзор выполнен с целью выявления достоинств и недостатков применяемого фильтровального оборудования и поиска направлений интенсификации процесса обезвоживания угольных концентратов при увеличении в них доли тонких частиц для получения чистого фильтрата, пригодного для направления в линию оборотного водоснабжения фабрик. В работе рассмотрены процессы и оборудование ведущих российских и зарубежных производителей, применяемые в настоящее время на обогатительных фабриках для обезвоживания угольных флотационных концентратов. Отмечено, что наибольшее распространение получили дисковые вакуум-фильтры и гипербар-фильтры. Последние характеризуются высокой удельной производительностью и их применение целесообразно для обезвоживания сравнительно труднофильтруемых суспензий. В то же время камерные и ленточные фильтр-прессы применяются сравнительно редко. Осадительно-фильтрующие центрифуги эксплуатируют на некоторых обогатительных фабриках для обезвоживания смесей флотационного и мелкого гравитационного концентратов. Для рассмотренных процессов приведены значения влажности осадка, содержания твёрдой фазы в фильтрате, а для процессов обезвоживания фильтрованием – также удельной производительности по твёрдой фазе. Показаны достоинства и недостатки приведенного оборудования. Приведены методы интенсификации процессов флотационного обезвоживания. Показано, что применение флокулянтов на дисковых вакуум-фильтрах обеспечивает повышение скорости разделения суспензий и снижение содержания твердой фазы в фильтрате. Для исключения из технологического цикла термической сушки возможно применение гипербар-фильтров, оборудованных системой подачи перегретого водяного пара. Показано, что важным условием повышения эффективности обезвоживания флотационного концентрата является предварительное разрушение пены. Одним из перспективных способов представляется подача на пену под давлением раствора флокулянта в виде струй. Отмечено, что до настоящего времени в целом не решена проблема получения при обезвоживании флотационного концентрата чистого фильтрата, пригодного для направления в линию оборотного водоснабжения фабрик. Это обуславливает усложнение технологической схемы и снижение выхода товарной продукции.

Ключевые слова: угольный флотационный концентрат, обезвоживание, дисковые вакуум-фильтры, гипербар-фильтры, фильтр-прессы, осадительно-фильтрующие центрифуги, флокуляция, разрушение пены

© Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Хамзина Т.А., 2022

Для цитирования

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Хамзина Т.А. Состояние процессов обезвоживания угольных флотационных концентратов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 26-36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-26-36>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

COAL FROTH CONCENTRATE DEWATERING PROCESSES

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Khamzina T.A.

Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. This review is aimed at identifying advantages and disadvantages of applied filtering equipment and seeking ways to intensify coal concentrate dewatering, when increasing a share of fine particles to produce clean filtrate suitable for a recycling water supply line of plants. The paper describes processes and equipment of leading Russian and foreign manufacturers currently applied at beneficiation plants for coal concentrate dewatering. Vacuum and hyperbaric disc filters are noted to be mostly used, while the latter are characterized by high specific performance; therefore, it is feasible to use them for dewatering rather difficult-to-filter suspended matters. Chamber and belt filter presses are comparatively rare yet. Decanter centrifuges are operated at some coal preparation plants for dewatering mixtures of coal froth and fine gravity concentrates. The paper contains the values of cake moisture and solids content in the filtrate for the processes under consideration, and solid-phase specific output for dewatering by filtration. The authors describe advantages and disadvantages of the equipment and methods for intensifying dewatering. It is shown that the use of flocculants on vacuum disc filters provides for an increase in the rate of separation of suspended matters and a decrease in the solids content in the filtrate. To exclude thermal drying from the process cycle, hyperbaric filters may be used with a superheated steam supply system. An important condition for increasing efficiency of froth concentrate dewatering is a preliminary froth destruction. One of the promising methods is the jet supply of flocculants to the froth. It is noted that the problem of dewatering the froth concentrate to produce a clean filtrate suitable for supplying to the recycling water supply line of coal preparation plants has not been solved yet. This leads to increased complexity of the process flow chart and a decreased yield of marketable products.

Keywords: coal froth concentrate, dewatering, vacuum disc filters, hyperbaric filters, filter presses, decanter centrifuges, flocculation, froth destruction

For citation

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Khamzina T.A. Coal Froth Concentrate Dewatering Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 26-36. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-26-36>

Введение

В настоящее время флотацией обогащают тонкие классы коксующихся углей на 28-ми обогатительных фабриках (ОФ) России. Значение этого процесса возрастает в связи с тенденцией к увеличению доли тонких частиц в добываемых углях [1]. Совершенствование процессов обогащения коксующихся углей осуществляется с целью повышения эффективности ресурсо- и энергосбережения, уменьшения выбросов вредных веществ в окружающую среду. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость повышения эффективности процессов обезвоживания флотационного концентрата (ФК), прежде всего снижения влажности обезвоженного осадка и уноса твёрдой фазы в фильтрат, повышения скорости разделения суспензий.

Особенности процесса обезвоживания ФК на углеобогащительных фабриках (ОФ) заключаются в следующем [1-5]:

- суспензия продукта, поступающего на обезвоживание с флотационных машин, характеризуется сравнительно высоким содержанием твёрдой фазы, порядка 150-300 кг/м³, поэтому сгущение суспензии не требуется;

- после обезвоживания фильтрованием ФК на

некоторых ОФ направляют на термическую сушку, которая является самой затратной и экологически опасной операцией в технологической схеме обогащения углей, поэтому для уменьшения себестоимости концентрата и ущерба от загрязнения окружающей среды пылевыми и газовыми выбросами сушильных установок существенное значение имеет снижение влажности флотационного концентрата в процессе его обезвоживания.

Целью работы является оценка состояния процессов обезвоживания угольных флотационных концентратов, применяемого оборудования и выявления направлений совершенствования этих процессов.

Процессы и оборудование для обезвоживания ФК

Для обезвоживания ФК на отечественных и зарубежных ОФ с середины XX в. до настоящего времени широко применяют *дисковые вакуум-фильтры* (ДВФ). В числе ведущих производителей этого оборудования за рубежом являются:

- "Andritz AG" (Австрия), выпускает для угольной промышленности ДВФ под маркой "Stardisc" с площадью поверхности фильтрования от 60 до 247 м² [6];

– "FLSmidt" (Дания-США, включает бывшие "Dorr Oliver" и "Eimco"), площадь поверхности фильтрования фильтров марки "Edisc" – до 310 м^2 [7];

– ОАО БМЗ «Прогресс» (Украина), выпускает типоразмерный ряд фильтров ДОО с площадью поверхности фильтрования от 16 до 250 м^2 [8].

В России дисковые вакуум-фильтры для угольной и горнорудной промышленности выпускают следующие предприятия:

– УК «Рудгормаш» (г. Воронеж), выпускает фильтры ДОО с площадью поверхности фильтрования 63, 80 и 100 м^2 [9];

– ООО «Гидротренд» (г. Екатеринбург), выпускает фильтры типоразмерных рядов ДОО с площадью поверхности фильтрования от 16 до 250 м^2 и ДТО с площадью поверхности фильтрования 34, 51 и 68 м^2 [10].

Конструктивные различия между перечисленными фильтрами различных производителей несущественны.

Область применения ДВФ ограничена следующими требованиями к сырью:

– удельное объёмное сопротивление осадка α_0 не более $(2-3) \cdot 10^{13} \text{ м}^2$, это обусловлено тем, что при минимальном значении частоты вращения дисков толщина осадка h должна составлять не менее 7-8 мм, в противном случае эффективность съёма осадка отдувкой существенно снижается;

– скорость расслоения суспензии не более 18 мм/с ;

– содержание частиц крупностью $+0,5 \text{ мм}$ не более 5%.

ДВФ эксплуатируют при значении вакуума $(5-8) \cdot 10^4 \text{ Па}$, избыточного давления в системе отдувки осадка $(0,5-1,5) \cdot 10^5 \text{ Па}$, частота вращения дисков $0,003-0,025 \text{ с}^{-1}$. На отечественных ОФ значения технологических показателей работы ДВФ при обезвоживании ФК без флокулянта (например, ГОФ «Томусинская», ОФ «Анжерская», ГОФ «Красногорская», ГОФ «Тайбинская»), как правило, находятся в следующих пределах [3, 11, 12]:

– удельная производительность по твёрдой фазе – $100-320 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$;

– влажность осадка – 25-31%;

– содержание твёрдой фазы в фильтрате весьма высокое – $35-50 \text{ кг/м}^3$, поэтому этот поток направляют не в линию оборотного водоснабжения ОФ, а на флотацию.

Достоинства ДВФ: непрерывный режим работы; сравнительная простота устройства и эксплуатации; возможности гибкого регулирования режима работы за счёт изменения частоты вра-

щения дисков; возможности подачи исходной суспензии на фильтр без применения насосов. Недостатки: относительно высокая влажность обезвоженного осадка; сравнительно высокое содержание твёрдой фазы в фильтрате.

Более высокая степень обезвоживания обеспечивается применением особой разновидности дисковых фильтров – *керамических фильтров* [13, 14]. Рабочая поверхность дисков изготовлена из специальной мелкопористой керамики. Обезвоживание суспензий происходит под действием капиллярных сил. Для регенерации рабочей поверхности фильтров после съёма осадка в каждом цикле предусмотрено удаление частиц твёрдой фазы из пор керамики ультразвуком и промывкой раствором азотной кислоты. Согласно [15], при обезвоживании угольных концентратов с содержанием твёрдой фазы 50-65% влажность осадка достигает 18-20% при удельной производительности $550-930 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$. Достоинства керамических фильтров заключаются в сравнительно высокой степени обезвоживания осадка и в меньших затратах энергии по сравнению с ДВФ. Недостатки: необходимость использования специальной, сравнительно дорогостоящей керамики и кислотоупорных конструкционных материалов; сложность эксплуатации. В России эти фильтры в настоящее время не применяют для обезвоживания угольных ФК. В то же время их применяют для обезвоживания рудных концентратов, например медного концентрата в ПАО «ГМК "Норильский никель"» [16].

Высокая эффективность обезвоживания ФК достигается применением *гипербар-фильтров* (ГБФ). Они представляют собой дисковый фильтр, помещённый в герметичный сосуд, работающий под избыточным давлением воздуха (**рис. 1**). Ведущий производитель ГБФ – "Andritz AG", площадь поверхности фильтрования – до 120 м^2 . Также ГБФ выпускает "Vokela GmbH" (Германия).

Первоначально ГБФ получили распространение на зарубежных предприятиях по обогащению углей с 80-х гг. XX в. [5, 18]. С начала XXI в. ГБФ были установлены на следующих ОФ России:

– на ЦОФ «Кузбасская» в 2004 г. были установлены ГБФ "Andritz" с площадью поверхности фильтрования 120 м^2 [19, 20];

– на ОФ «Междуреченская» с 2008 г. работают два ГБФ "Andritz" с площадью поверхности фильтрования 96 м^2 каждый [19];

– на ОФ «Матюшинская» с 2013 г. работают два ГБФ "Andritz" с площадью поверхности фильтрования 120 м^2 каждый [21].

Технологическая схема обезвоживания ФК на ГБФ предусматривает подачу исходной суспензии на фильтр обязательно насосом под давлением, отдельную подачу сжатого воздуха в корпус фильтра под давлением $(3-5) \cdot 10^5$ Па и в систему отдувки осадка под давлением $(7-8) \cdot 10^5$ Па.

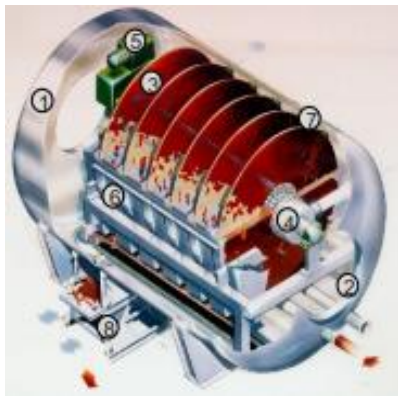


Рис. 1. Схема ГБФ фирмы "Andritz AG" [17]:
1 – сосуд под давлением; 2 – отверстие;
3 – диск, состоящий из секторов;
4 – распределительная головка; 5 – привод
ячейкового вала; 6 – ванна; 7 – мешалка
с наклонной осью вращения; 8 – устройство
для выгрузки осадка

Fig. 1. A hyperbaric disc filter by Andritz AG [17]: 1 is a pressure vessel; 2 is a manhole; 3 is a filter disc; 4 is a control head; 5 is a filter drive; 6 is a filter trough; 7 is a paddle agitator; 8 is a discharger

Согласно [3, 19, 21], технологические показатели работы ГБФ на ЦОФ «Кузбасская», ОФ «Междуреченская» и ОФ «Матюшинская» при обезвоживании суспензий угольных частиц с верхним пределом крупности 150 (200) мкм следующие: удельная производительность по твёрдой фазе соответственно 420, 750 и 500 кг/м²·ч, а влажность обезвоженного осадка для всех трёх ОФ примерно одинаковая – 19-22%. На некоторых зарубежных ОФ влажность достигает 16-18% [18].

По сравнению с ДВФ ГБФ обеспечивают более высокую удельную производительность по твёрдой фазе и более низкую влажность осадка, а также возможность эффективного обезвоживания сравнительно труднофильтруемых осадков (удельное объёмное сопротивление – до 10^{14} м²). В то же время для ГБФ характерны более высокие по сравнению с ДВФ капитальные и эксплуатационные затраты.

Под избыточным давлением воздуха работают также *фильтр-прессы плиточно-рамные и камерные (КФП)*, которые обеспечивают возможность глубокого обезвоживания флотационного концентрата за счёт просушки осадка воздухом под давлением до $1,6 \cdot 10^6$ Па или отжимом при помощи диафрагм. Ряд зарубежных фирм выпускает КФП

специально для продуктов обогащения углей, в том числе и с возможностью просушки осадка. Например, фирма Jingjin Equipment Co., Ltd. (Китай) выпускает крупнометражные камерные фильтр-прессы для обезвоживания продуктов обогащения углей с размерами плит до 2×2 м и площадью поверхности фильтрования (S) до 1200 м² [22]. Характерной особенностью конструкции выпускаемых этой фирмой КФП является одновременное перемещение при выгрузке осадка не одной, а нескольких (5-7) фильтрующих плит, что сокращает время операции.

Также крупнометражные КФП для обезвоживания продуктов обогащения выпускают фирмы: "Andritz AG" с S до 2000 м² [23]; "FLSmidt" с S до 2040 м² [24]; "Metso Outotec" с S до 850 м² [25] и ряд других.

Технологическая схема обезвоживания суспензий на КФП включает: компрессор, сосуд под давлением для подачи исходной суспензии на фильтр, сборник фильтрата, конвейер для обезвоженного осадка. Влажность последнего и содержание твёрдой фазы в фильтрате на КФП и ГБФ сопоставимы. В то же время КФП, в отличие от ДВФ и ГБФ, характеризуются периодическим режимом работы, и это обуславливает весьма низкую удельную производительность КФП по твёрдой фазе (не выше 50 кг/м²·ч), то есть примерно в 10-20 раз ниже по сравнению с ГБФ. Также для КФП капитальные затраты в несколько раз выше по сравнению с ДВФ и ГБФ. Поэтому применение КФП, по нашему мнению, целесообразно только для обезвоживания труднофильтруемых тонкодисперсных ФК, если нагрузка по твёрдой фазе сравнительно невелика (не выше 30-40 т/ч) и требуется глубокое обезвоживание осадка.

В настоящее время на ОФ России КФП применяют только для обезвоживания необогащённых шламов и отходов флотации [26-28]. За рубежом КФП сравнительно редко применяют для обезвоживания тонкодисперсных угольных суспензий. Согласно [29], в США на предприятии "Eastern US Coal Plant" с 1998 г. концентрат колонных флотационных машин крупностью 44 мкм обезвоживают на плиточно-рамных фильтр-прессах после предварительного разрушения пены, при этом влажность обезвоженного осадка составляет 22%. Также указано, что в Китае проводят исследования по применению автоматических фильтр-прессов, при этом влажность обезвоженного осадка составляет 16-18%, а производительность по твёрдой фазе 35-40 т/ч.

Процесс обезвоживания на *ленточных фильтр-прессах (ЛФП)* является конкурентоспособным по отношению к обезвоживанию на ДВФ при разделении сравнительно тонкодис-

персных суспензий и представляет интерес в качестве эффективного способа благодаря непрерывному режиму работы, простоте технологической схемы, невысоким капитальным и эксплуатационным затратам. На ОФ «Нерюнгринская» с 1999 г. осуществляют обезвоживание концентратов флотации углей с применением ЛФП [30, 31]. Технологическая схема предусматривает последовательное перемешивание суспензии концентрата с растворами анионоактивного и катионоактивного флокулянтов в статических смесителях и обезвоживание на ЛФП. Технологические показатели процесса при максимальной скорости движения лент, равной 0,35 м/с:

- содержание твёрдой фазы в исходной суспензии – 200-230 кг/м³;
- расход анионоактивного флокулянта – 101-152 г/т, катионоактивного – 76-113 г/т;
- влажность обезвоженного осадка – 30-33%;
- производительность фильтра по твёрдой фазе – 13-16 т/ч;
- содержание твёрдой фазы в фильтрате – до 25 кг/м³.

При этом на данной ОФ суммарные удельные затраты на обезвоживание ФК с применением ЛФП примерно в 1,2 раза ниже по сравнению с ДВФ.

В то же время для ЛФП характерны: более высокая влажность осадка по сравнению с КФП и ГБФ; высокий расход флокулянтов; низкая эффективность обезвоживания малосжимаемых осадков; возможность растекания суспензии по ленте в тех случаях, когда осадок к концу зоны дренирования не сформировался. Поэтому эта технология до настоящего времени не получила широкого распространения для обезвоживания ФК.

Обезвоживание с применением *центрифуг* является альтернативой фильтрационным методам. В настоящее время известно о применении осадительно-фильтрующих центрифуг (ОФЦ) для обезвоживания ФК совместно с мелким концентратом гравитационного обогащения крупностью от 0,2 до 1,0 (2,0) мм [11]. В числе ведущих производителей ОФЦ – "Andritz AG" [32], "FLSmidth" [33]. Устройство ОФЦ показано на **рис. 2**.

Согласно [35], ОФЦ эксплуатируют на ряде ОФ России. При этом на ЦОФ «Печорская», ОФ «Северная», ОФ «Антоновская» в питание центрифуг также добавляют ФК.

Значения технологических показателей работы ОФЦ для этих ОФ находятся в следующих пределах [11]:

- влажность обезвоженного осадка – 9-15%;
- унос твёрдой фазы в фугат – от 15 до 40%;
- производительность по твёрдой фазе – до 90 т/ч.

В отличие от фильтров, ОФЦ не требуют энергоёмкого вспомогательного оборудования и обеспечивают сравнительно низкую влажность обезвоженного осадка, что позволяет исключить термическую сушку. Главный недостаток: весьма значительный унос твёрдой фазы в фугат – до 40%. Это, в свою очередь, снижает выход товарного концентрата и создаёт проблемы с дальнейшим использованием фугата.

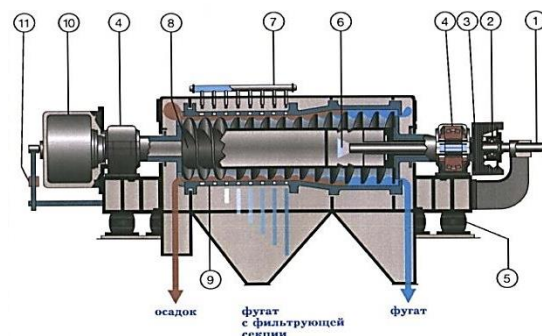


Рис. 2. Схема устройства осадительно-фильтрующей центрифуги [34]: 1 – питающая труба; 2 – упорные подшипники; 3 – ведомый шкив; 4 – главные подшипники; 5 – амортизаторы; 6 – питающая камера; 7 – система брызгал для промывки фильтрующей секции; 8 – шнек; 9 – фильтрующая секция; 10 – планетарный редуктор; 11 – датчик крутящего момента

Fig. 2. A decanter screen bowl centrifuge [34]: 1 is a feeding pipe; 2 are thrust bearings; 3 is a driven pulley; 4 are main bearings; 5 are shock absorbers; 6 is a feeding chamber; 7 is a sprinkler system for washing the screen section; 8 is a conveyor; 9 is a screen section; 10 is a planetary gearbox; 11 is a torque sensor

Методы повышения эффективности процессов обезвоживания ФК

Применение флокулянтов позволяет существенно повысить скорость разделения суспензий ФК, в особенности на ДВФ: удельная производительность по твёрдой фазе возрастает в 1,5-3 раза, содержание твёрдой фазы в фильтрате снижается в 2-3 раза. Флокулянты применяют на некоторых ОФ России, в том числе: ЦОФ «Сибирь», ЦОФ «Абашевская», ГОФ «Кузнецкая». Расход, как правило, составляет 5-30 г/т (в отдельных случаях до 100 г/т), удельная производительность по твёрдой фазе – в среднем 300 кг/м²·ч, влажность осадка – до 30%.

Из литературных данных известно, что зависимость значений влажности W и удельного сопротивления осадка α_0 от расхода флокулянта носит экстремальный характер [36, 37]. Такой характер зависимости для α_0 обусловлен, вероятно, насыщением адсорбционного слоя на поверхности частиц твёрдой фазы макромолекула-

ми флокулянта, а также увеличением вязкости фильтрата за счёт появления в нём избытка флокулянта. Значение W с увеличением расхода флокулянта сначала снижается за счёт увеличения диаметра пор, но дальнейший рост влажности обусловлен увеличением доли воды, иммобилизованной в пространстве между частицами. Поэтому для определения оптимальных значений расхода флокулянта в каждом конкретном случае целесообразно выполнение лабораторных экспериментальных исследований по обезвоживанию ФК фильтрованием под вакуумом для выбора наиболее эффективной марки флокулянта и его расхода q . По нашему мнению, оптимальное значение q находится в интервале между величинами, соответствующими минимальному значению α_0 и минимальной влажности осадка W .

Следует отметить, что на указанных ОФ применение флокулянтов не обеспечивает получение чистого фильтрата, пригодного для использования в линии оборотного водоснабжения, поэтому для извлечения угольных частиц фильтрат направляют на флотацию или на классификацию с последующей флотацией слива. Применение флокулянтов в процессе обезвоживания ФК на ГБФ нецелесообразно в связи с механической деструкцией флокул под действием насоса подачи суспензии и мешалок в ванне фильтра.

При организации процесса обезвоживания ФК с применением флокулянтов необходимо контролировать скорость течения суспензии таким образом, чтобы свести к минимуму деструкцию флокул.

Согласно [38], максимальная допустимая скорость течения суспензии по трубопроводам диаметром 0,2-0,6 м при расходе флокулянта 50 г/т составляет в среднем 1,8 м/с, а для расходов 100 и 200 г/т – соответственно 2,6 и 3,9 м/с. Рациональный режим течения суспензий ФК, обеспечивающий сохранность флокул, согласно [38], целесообразно определять расчётным путём с учетом расхода флокулянта.

Просушка осадка перегретым водяным паром. В настоящее время известно, что этот способ применяют при обезвоживании ФК на ГБФ. Ранее попытки использования водяного пара для интенсификации других процессов обезвоживания показали низкую эффективность. По данным фирмы "Vokela GmbH" [39] ГБФ, оборудованные системой подачи перегретого пара, при обезвоживании ФК обеспечивают получение осадка с влажностью 8-11%, что исключает необходимость термической сушки. В то же время применение пара требует весьма значительных затрат энергии, сопоставимых с затратами на термическую сушку. Поэтому описанный способ не является универсальным, для его реализации в условиях конкрет-

ной ОФ требуется выполнение технико-экономического обоснования с учётом затрат на обезвоживание и термическую сушку ФК.

Ранее проводились исследования по просушке осадков ФК горячими дымовыми газами на патронных фильтрах под давлением, однако в связи с повышенной опасностью пожара и взрыва способ не получил развития.

Применение ПАВ осуществляют, как правило, при обезвоживании ФК фильтрованием под вакуумом [40, 41] с целью снижения влажности обезвоженного осадка на величину до 4% (абс.). В то же время есть основания полагать, что добавление этих реагентов может привести к стабилизации суспензии угольных частиц и, как следствие, к увеличению значения α_0 и, соответственно, снижению производительности фильтров.

Одним из важнейших условий эффективного обезвоживания ФК является *разрушение флотационной пены*. Характерное время этого процесса при его самопроизвольном протекании – несколько минут [42], но в условиях действующих предприятий, как правило, пена не успевает разрушиться к моменту поступления на операцию обезвоживания. Поэтому на практике реализуют следующие способы принудительного пеногашения [43]:

– Механические, заключающиеся в воздействии внешних сил. На практике реализуются в центробежных аппаратах, в которых жидкостная плёнка разрушается под действием сил инерции. В вакуумных аппаратах разрушение плёнки жидкости происходит за счёт увеличения разности давлений. Эффективность гашения пены при механическом способе составляет 30-40%, при вакуумном – 60%, при вакуумно-механическом – до 80% [43]. Также используется струйный способ [44], заключающийся в обработке пены струями воды, подаваемыми под давлением через распылительные устройства. По нашему мнению, перспективность этого способа заключается в возможности совмещения операции разрушения пены с флокуляционным кондиционированием, если вместо чистой воды подаётся раствор флокулянта.

– Химические [45, 46], заключающиеся в обработке пены реагентами, ускоряющими её разрушение.

– Комбинации механических и химических методов.

Из вышеизложенного следует, что существуют значительные и до настоящего времени полностью не реализованные возможности для повышения эффективности обезвоживания флотационного концентрата.

Сравнительные данные по технологическим показателям обезвоживания ФК на фильтровальном оборудовании приведены в **таблице**.

Таблица. Значения технологических показателей работы фильтровального оборудования при обезвоживании флотационного концентрата

Table. Performance of the filtering equipment for coal froth concentrate dewatering

Наименование оборудования	Значения технологических показателей		
	Удельная производительность по твёрдой фазе, кг/м ² ·ч	Влажность обезвоженного осадка, %	Содержание твёрдой фазы в фильтрате, кг/м ³
Дисковые вакуум-фильтры:			
– без флокулянта	100-320	25-31	35-50
– с флокулянтом	200-400	25-30	до 20
Гипербар-фильтры	400-800	16-22	до 10
Камерные фильтр-прессы	до 50	16-22	до 10
Ленточные фильтр-прессы	до 6*	30-33	до 25

* Удельная производительность на ширину ленты, кг/м·ч.

Заключение

1. В настоящее время для операции обезвоживания угольных флотационных концентратов применяют главным образом:

– дисковые вакуум-фильтры, обеспечивающие удельную производительность по твёрдой фазе до 320 кг/м²·ч, влажность обезвоженного осадка 25-31%;

– гипербар-фильтры, для которых по сравнению с дисковыми вакуум-фильтрами удельная производительность по твёрдой фазе выше в 2,5-4 раза, влажность обезвоженного осадка меньше на 6-10% (абс.), содержание твёрдой фазы в фильтрате меньше в 3,5-10 раз. Фильтры целесообразны и перспективны для обезвоживания сравнительно труднофильтруемых суспензий, эффективное обезвоживание которых на дисковых вакуум-фильтрах невозможно;

– камерные фильтр-прессы, характеризующиеся весьма низкой удельной производительностью (до 50 кг/м²·ч), а также ленточные фильтр-прессы, требующие значительного расхода флокулянтов, применяются сравнительно редко;

– осадительно-фильтрующие центрифуги – для обезвоживания смесей флотационного и мелкого гравитационного концентратов.

2. Для интенсификации процесса обезвоживания флотационных концентратов на дисковых вакуум-фильтрах применяют флокулянты, которые обеспечивают повышение скорости разделения суспензий в 1,5-3 раза и снижение содержания твердой фазы в фильтрате в 2-3 раза. Перспективы совершенствования процесса обезвоживания флотационных концентратов с применением флокулянтов заключаются в оптимизации значений их расходов и скорости течения суспензий, обработанных флокулянтами.

3. Для исключения из технологического цикла термической сушки возможно применение гипербар-фильтров, оборудованных систе-

мой подачи перегретого водяного пара и обеспечивающих получение обезвоженного осадка с влажностью 8-11%.

4. Для повышения эффективности обезвоживания флотационного концентрата целесообразно предварительное разрушение пены. Одним из перспективных способов представляется подача на пену под давлением раствора флокулянта в виде струй.

5. Актуальной проблемой при обезвоживании флотационного концентрата является получение чистого фильтрата для направления в линию оборотного водоснабжения фабрик.

Список источников

1. Антипенко Л.А. Новые подходы к проектированию современных углеобогачительных фабрик // Уголь. 2020, № 7. С. 82-87.
2. Техника и технология обогащения углей. Справочное пособие / под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Молявко. М.: Наука, 1995. 620 с.
3. Novak V. The analysis of process flowsheets and selection of equipment for coal fines dewatering // Proc. XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June-01 July 2016 Saint-Petersburg, Russia. – Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016. P. 689-694.
4. Антипенко Л.А., Кравченко А.Е. Современное состояние и перспективы развития водно-шламовых систем углеобогачительных фабрик // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2017, № 4. С. 156-165.
5. Bickert G. Solid-liquid separation technologies for coal: The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Volume 1: Coal Production. Ed. by Dave Osborne. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013. P. 422-445.
6. Separation. Maximum dewatering of fine coal particles. STARDISC vacuum disc filter [Электронный ресурс]: Сайт Andritz AG. URL: <https://www.andritz.com/resource/blob/269416/9b751599022b7dd4f41b0120f7bc196f/se-pas-stardisc-for-coal-en-data.pdf> (Дата обращения: 31.08.2022).

7. FLSmidth E-Disc [Электронный ресурс]: Сайт FLSmidth. Режим доступа: <https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/flsmidth-e-disc-brochure.pdf> (Дата обращения: 31.08.2022).
8. Каталог оборудования «Прогресс» [Электронный ресурс]: Сайт Прогресс-Урал Инжиниринг. URL: http://progressural.com/files/Katalog_ProgressUralInzhiniring.pdf (Дата обращения: 31.08.2022).
9. Вакуум-фильтры типа ДОО [Электронный ресурс]: Сайт ОАО УК «Рудгормаш». URL: <https://www.rudgormash.ru/?mcat=1357> (Дата обращения: 31.08.2022).
10. Дисктовые вакуум-фильтры [Электронный ресурс]: Сайт ООО «Гидротренд». URL: <https://hydrotrend.ru/vakuum-filters/disk-vakuum-filters/> (Дата обращения: 31.08.2022).
11. Антипенко Л.А. Технологические регламенты обогатительных фабрик Кузнецкого бассейна. Прокопьевск: Прокопьевское полиграфическое производственное объединение, 2007. 463 с.
12. Оценка предельной влажности угольного концентрата в промышленных обезвоживающих аппаратах / Шиляев М.И., Горбунков А.И., Богомолов А.Р., Хромова Е.М., Темникова Е.Ю. // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2017, № 3. С. 163-174.
13. Фильтрация технологических пульп / Белоглазов И.Н., Голубев В.О., Тихонов О.Н., Кука Ю., Яскелийнен Эд. М.: Руда и металлы, 2003. 320 с.
14. Ken Sutherland, George Chase. Filters and Filtration Handbook. 5th edition. Amsterdam: Elsevier, 2008. 522 P.
15. Ceramic Vacuum Disc Filter for Coal Mining [Электронный ресурс]: Сайт Zhengzhou Uniwin Filtering Equipment Co., ltd. URL: <https://www.press-filter.com/product-detail/ceramic-vacuum-disc-filter/> (Дата обращения: 31.08.2022).
16. Разработка способа регенерации керамических элементов вакуум-фильтров на участке фильтрации медного концентрата сушильного цеха Медного завода / Ефимов А.А., Большакова О.В., Глибовец М.В., Мидюков Д.О. // Цветные металлы. 2022. № 2. С. 64-70. DOI: 10.17580/tsm.2022.02.08.
17. Raberger R., Dmitriewa T., Frohnwieser E., Krammer G. New control head design for hyperbaric disk filter gives better performance and longer life-time // Proc. XVIII International Coal Preparation Congress, 28 June-01 July 2016 Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016. P. 765-770.
18. Parekh B.K., Hogg R., Fonseca A. Evaluation of hyperbaric filtration for fine coal dewatering. Final report DOE Grant № DE-FG22-92PC92520. Pittsburg: U.S. Department of Energy Pittsburgh Energy Technology Center, 1996. 162 p.
19. Сазыкин Г.П. Новое поколение углеобогатительных фабрик Кузбасса // Энергетическая безопасность России. Новые подходы к развитию угольной промышленности: тр. междунар. науч.-практ. конф. Кемерово: НИЦ ГП – ИГД им. А.А. Скочинского, ИУУ СО РАН, КузГТУ, ЗАО КВК «Экспо-Сибирь», 2005. С. 63-68.
20. Милованова Е. Перемены к лучшему // Глобус. 2021. № 2 (66). С. 104-106.
21. Белокопытов П.И. Сушка горячей поверхностью – альтернатива термическим воздушным сушкам // Уголь. 2019. № 8. С. 108-109.
22. Фильтр-прессы горизонтальные [Электронный ресурс]: Сайт компании JINGJIN. URL: <https://jingjin.su/> (Дата обращения: 31.08.2022).
23. Andritz sidebar and overhead filter presses [Электронный ресурс]: Сайт Andritz AG. URL: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/filter-presses/filter-press-side-bar-overhead> (Дата обращения: 31.08.2022).
24. EIMCO® Colossal™ automatic filter press (AFP) [Электронный ресурс]: Сайт FLSmidth. URL: https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/pressure-filters/colossalfilterpress_brochure_email.pdf (Дата обращения: 31.08.2022).
25. FPS filter [Электронный ресурс]: Сайт Metso Outotec. URL: <https://www.mogroup.com/portfolio/fp-s-filter-press/> (Дата обращения: 31.08.2022).
26. Дадаева Е. Концентрат качества и технологий // Глобус. 2019. № 3 (57). С. 36-42.
27. ООО «Эльгауголь». Эльгинский угольный комплекс. Сезонная обогатительная установка. Реконструкция в связи с переводом на круглогодичный режим работы. Проектная документация 46-2020/П-Д [Электронный ресурс] / ООО «Сибгеопроект». URL: <http://www.neruadmin.ru/upload/iblock/e5b/e5b521b4e2c567b3ef3a6b8a3b10da6d.pdf> (Дата обращения: 31.08.2022).
28. Установка камерных фильтр-прессов на обогатительных фабриках – это следование высочайшим экологическим стандартам [Электронный ресурс] / ТопПром Холдинг. URL: https://top-prom.ru/press-center/news/ustanovka_kamernyh_filtropressov_na_obogatitelnyh_fabrikah_eto sledovanie_vysochajshim_ekologicheskim_standartam_holding_topprom/ (Дата обращения: 31.08.2022).
29. Hand P.E. Dewatering and drying of fine coal to a saleable product: COALTECH 2020. 100 p.
30. Засядько А.В., Панфилов Ф.А., Гольберг Г.Ю. Опыт эксплуатации ленточных фильтр-прессов на операции обезвоживания концентратов и промпродуктов флотации коксующихся углей ОФ «Нерюн-гринская» // Кокс и химия. 2000. № 9. С. 9-11.
31. Zasyadko A.V., Kostromitin A.V., Osadchiy S.A., Lobanov F.I., Panfilov P.F., Golberg G.Yu. Dewatering of Flotation Concentrates and Middlings on Belt Press Filters // Proc. XV International Coal Preparation Congress and Exhibition. Beijing: China University of Mining and Technology Press. 2006. V. 2. P. 545-548.
32. Industrial processes redefined with ANDRITZ decanter centrifuges A [Электронный ресурс]: Сайт Andritz

AG. URL: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/decanter-centrifuges/decanter-centrifuges-a>. (Дата обращения: 31.08.2022).

33. Decanter Screenbowl Centrifuge [Электронный ресурс]: Сайт FLSmidth. URL: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/centrifugation-and-classification/decanter-screenbowl-centrifuge> (Дата обращения: 31.08.2022).
34. Mohanty M.K. Screen Bowl Centrifuge Dewatering Process: A Parametric Study // *Physical Separation in Science and Engineering*. 2007, Article ID 70376. 9 p.
35. Осадительно-фильтрующие центрифуги [Электронный ресурс]: Сайт Коралайна Инжиниринг. URL: http://coralina.ru/catalog/index.php?SECTION_ID=54&ELEMENT_ID=937. (Дата обращения: 31.08.2022).
36. Байченко А.А., Кардашов А.В. Действие композиций высокомолекулярных флокулянтов при обезвоживании флотационного угольного концентрата // *Вестник КузГТУ*. 2005. № 3. С. 66-69.
37. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics // *Vacuum*. 2015. V. 114. P. 50-57.
38. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранение флокуляционных структур // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2019. № 3. С. 106-112.
39. Hahn J., Bott R., Langeloh T. HiBar Steam Pressure Filtration of Coal Ultrafines – New Developments and Results // *Proc. XVIII International Coal Preparation Congress*, 28 June-01, July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016. P. 141-146.
40. Singh B.P. The influence of surface phenomena on the dewatering of fine clean coal // *Filtration & Separation*. 1997. V. 34, № 2. P. 159-163.
41. Nkolele A. Investigations into the reduction of moisture in fine coal by plant tests with surfactants // *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004, V. 104. P. 171-176.
42. Nguyen A.V. Flotation. In: *Encyclopedia of Separation Science*. Academic Press, 2000. P. 1-27.
43. Клейн М.С., Вахонина Т.Е. *Технология обогащения углей: учебное пособие*. Кемерово: КузГТУ, 2011. 128 с.
44. Тихомиров В.К. *Пены. Теория и практика их получения и разрушения*. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1983. 264 с.
45. Krasteva M., Tzotzorkov L., Nikolov D., Grigorova I., Nishkov I. Reagent – enhanced destruction of flotation froths // *Proc. of 24th International Mineral Processing Congress*, September, Beijing, China, 2008, pp. 2116-2122.
46. Yeşilyurt Z., Hassas B.V., Karakaş F., Boylu F. Ultrafine coal flotation and dewatering: Selecting the surfactants of proper hydrophilic–lipophilic balance (HLB) // *International Journal of Coal Preparation and Utilization*. 2020. V. 40, № 8. P. 564-580.

References

1. Antipenko L.A. New approaches to the design of modern coal processing plants. *Ugol [Coal]*, 2020, no. 7, pp. 82-87. (In Russ.)
2. Chanturiya V.A., Molyavko A.R. *Tekhnika i tekhnologiya obogashcheniya ugley. Spravochnoe posobie [Process and equipment for coal preparation]*. Moscow: Nauka, 1995, 620 p. (In Russ.)
3. Novak V. The analysis of process flowsheets and selection of equipment for coal fines dewatering. *Proceedings of the 18th International Coal Preparation Congress*, 28 June - 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016, pp. 689-694.
4. Antipenko L.A., Kravchenko A.E. Water-slurry circuits at coal preparation plants: current state and development prospects. *Gorny informatsionno-analiticheskiy byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*, 2017, no. 4, pp. 156-165. (In Russ.)
5. Bickert G. Solid-liquid separation technologies for coal. The coal handbook: Towards cleaner production. Volume 1: Coal Production. Ed. by Dave Osborne. Philadelphia: Woodhead Publishing, 2013, pp. 422-445.
6. Separation. Maximum dewatering of fine coal particles. STARDISC vacuum disc filter by Andritz AG. Available at: <https://www.andritz.com/resource/blob/269416/9b751599022b7dd4f41b0120f7bc196f/s-e-pas-stardisc-for-coal-en-data.pdf> (Accessed on August 31, 2022).
7. FLSmidth E-Disc. Available at: <https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/flsmidth-e-disc-brochure.pdf> (Accessed on August 31, 2022).
8. Progress-Ural Engineering equipment catalog. Available at: http://progressural.com/files/Katalog_ProgressUralInzhiniring.pdf (Accessed on August 31, 2022).
9. Vacuum filters of DOO type. Available at: <https://www.rudgormash.ru/?mcat=1357> (Accessed on August 31, 2022).
10. Vacuum disc filters. Available at: <https://hydrotrend.ru/vakuum-filters/disk-vakuum-filters/> (Accessed on August 31, 2022).
11. Antipenko L.A. *Tekhnologicheskie reglamenty obogatitelnykh fabrik Kuznetskogo basseina [Process regulations of beneficiation plants of the Kuznetsk Basin]*. Prokopenk: Prokopenk Printing Production Association, 2007, 463 p. (In Russ.)
12. Shilyaev M.I., Gorbunkov A.I., Bogomolov A.R., Khromova E.M., Temnikova E.Yu. Limit moisture content of coal concentrate produced with industrial drainers. *Journal of Mining Science*, 2017, 53, 573-584.
13. Beloglazov I.N., Golubev V.O., Tikhonov O.N., Kuukka J., Jaaskelainen Ed. *Filtrovaniye tekhnologicheskikh pulp [Filtration of technological pulps]*. Moscow: Ore and metals, 2003, 320 p. (In Russ.)

14. Ken Sutherland, George Chase. Filters and filtration handbook. 5th edition. Amsterdam: Elsevier, 2008, 522 p.
15. Ceramic vacuum disc filter for coal mining. Available at: <https://www.press-filter.com/product-detail/ceramic-vacuum-disc-filter/> (Accessed on August 31, 2022).
16. Efimov A.A., Bolshakova O.V., Glibovets M.V., Midyukov D.O. Developing a method for regenerating ceramic elements of vacuum filters on the screen section of copper concentrate at the drying shop of the Copper Plant. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals], 2022, no. 2, pp. 64-70. DOI: 10.17580/tsm.2022.02.08.
17. Raberger R., Dmitriewa T., Frohnwieser E., Krammer G. New control head design for hyperbaric disk filter gives better performance and longer life-time. Proceedings of the 18th International Coal Preparation Congress, 28 June - 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016, pp. 765-770.
18. Parekh B.K., Hogg R., Fonseca A. Evaluation of hyperbaric filtration for fine coal dewatering. Final report. DOE Grant No. DE-FG22-92PC92520. Pittsburgh: U.S. Department of Energy, Pittsburgh Energy Technology Center, 1996, 162 p.
19. Sazykin G.P. A new generation of coal preparation plants of the Kuznetsk Basin. *Energeticheskaya bezopasnost Rossii. Novye podkhody k razvitiyu ugolnoy promyshlennosti. Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Energy security of Russia. New approaches to the development of the coal industry: Proceedings of the international scientific and practical conference]. Kemerovo: Skochinsky National Research Center of Mining – Mining Institute, Coal and Coal Chemistry Institute of the Siberian Branch, the Russian Academy of Sciences, Kuzbass State Technical University, CJSC Kuzbass Exhibition Company Expo-Siberia, 2005, pp. 63-68. (In Russ.)
20. Milovanova E. Changes for the better. *Globus* [Globe], 2021, no. 2 (66), pp. 104-106. (In Russ.)
21. Belokopytov P.I. Drying using a hot surface is an alternative to thermal air dryers. *Ugol* [Coal], 2019, no. 8, pp. 108-109. (In Russ.)
22. Horizontal filter presses. Available at: <https://jingjin.su/> (Accessed on August 31, 2022).
23. Andritz sidebar and overhead filter presses. Available at: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/filter-presses/filter-press-side-bar-overhead> (Accessed on August 31, 2022).
24. EIMCO® Colossal™ automatic filter press (AFP). Available at: https://www.flsmidth.com/-/media/brochures/brochures-products/filtration/pressure-filters/colossalfilterpress_brochure_email.pdf (Accessed on August 31, 2022).
25. FPS filter. Available at: <https://www.mogroup.com/portfolio/fp-s-filter-press/> (Accessed on August 31, 2022).
26. Dadaeva E. A concentrate of the quality and technologies. *Globus* [Globe], 2019, no. 3 (57), pp. 36-42. (In Russ.)
27. LLC ElgaCoal. Elga Coal Complex. Seasonal preparation plant. Revamping due to a transition to a continuous operation throughout the year. Design documentation 46-2020/P-D. Available at: <http://www.neruadmin.ru/upload/iblock/e5b/e5b521b4e2c567b3ef3a6b8a3b10da6d.pdf> (Accessed on August 31, 2022).
28. Installing chamber filter presses at preparation plants means following highest environmental standards. Available at: https://top-prom.ru/press-center/news/ustanovka_kamernyh_filtressov_na_obogatitelnyh_fabrikah_eto_sledovanie_vysochajshim_ekologicheskim_standartam_holding_topprom/ (Accessed on August 31, 2022).
29. Hand P.E. Dewatering and drying of fine coal to a saleable product. *COALTECH 2020*, 100 p.
30. Zasyadko A.V., Panfilov F.A., Golberg G.Yu. Experience in the operation of belt filter presses used for dewatering concentrates and industrial products of flotation of coking coals at the Neryungrinskaya Coal Preparation Plant. *Koks i khimiya* [Coke and Chemistry], 2000, no. 9, pp. 9-11. (In Russ.)
31. Zasyadko A.V., Kostromitin A.V., Osadchiy S.A., Lobanov F.I., Panfilov P.F., Golberg G.Yu. Dewatering of flotation concentrates and middlings on belt press filters. Proceedings of the 15th International Coal Preparation Congress and Exhibition. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 2006, vol. 2, pp. 545-548.
32. Industrial processes redefined with ANDRITZ decanter centrifuges A. Available at: <https://www.andritz.com/products-en/group/separation/decanter-centrifuges/decanter-centrifuges-a>. (Accessed on August 31, 2022).
33. Decanter screenbowl centrifuge. Available at: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/centrifugation-and-classification/decanter-screenbowl-centrifuge> (Accessed on August 31, 2022).
34. Mohanty M.K. Screen bowl centrifuge dewatering process: A parameteric study. *Physical Separation in Science and Engineering*, 2007, Article ID 70376, 9 p.
35. Decanter screen bowl centrifuges. Available at: http://coralina.ru/catalog/index.php?SECTION_ID=54&ELEMENT_ID=937 (Accessed on August 31, 2022).
36. Baychenko A.A., Kardashov A.V. Effect of mixtures of high-molecular flocculants during dewatering of coal froth concentrates. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Kuzbass State Technical University], 2005, no. 3, pp. 66-69. (In Russ.)
37. Yuping Fan, Xianshu Dong, Hui Li. Dewatering effect of fine coal slurry and filter cake structure based on particle characteristics. *Vacuum*, 2015, 114, 50-57.
38. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Flow regime of mineral suspensions with preserved structure of flocs. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh* [Journal of Mining Science], 2019, no. 3, pp. 106-112. (In Russ.)
39. Hahn J., Bott R., Langeloh T. HiBar steam pressure fil-

- tration of coal ultrafines – New developments and results. Proceedings of the 18th International Coal Preparation Congress, 28 June – 01 July 2016, Saint-Petersburg, Russia. Saint-Petersburg: Springer International Publishing AG, ed. by V. Litvinenko, 2016, pp. 141-146.
40. Singh B.P. The influence of surface phenomena on the dewatering of fine clean coal. *Filtration & Separation*, 1997, 34 (2), 159-163.
41. Nkolele A. Investigations into the reduction of moisture in fine coal by plant tests with surfactants. *The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, 2004, 104, 171-176.
42. Nguyen A.V. Flotation. In *Encyclopedia of Separation Science*, Academic Press, 2000, pp. 1-27.
43. Klein M.S., Vakhonina T.E. *Tekhnologiya obogashcheniya uglej: uchebnoe posobie* [Coal preparation technology: study guide]. Kemerovo: Kuzbass State Technical University, 2011, 128 p. (In Russ.)
44. Tikhomirov V.K. *Peny. Teoriya i praktika ikh polucheniya i razrusheniya* [Froth. Theory and practice of its production and destruction]. Moscow: Khimiya, 1983, 264 p. (In Russ.)
45. Krasteva M., Tzotzorkov L., Nikolov D., Grigorova I., Nishkov I. Reagent – enhanced destruction of flotation froths. Proc. of the 24th International Mineral Processing Congress, September, Beijing, China, 2008, pp. 2116-2122.
46. Yeşilyurt Z., Hassas B.V., Karakaş F., Boylu F. Ultrafine coal flotation and dewatering: Selecting the surfactants of proper hydrophilic–lipophilic balance (HLB). *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 2020, 40 (8), 564-580.

Поступила 01.09.2022; принята к публикации 30.09.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 01/09/2022; revised 30/09/2022; published 22.12.22

Лавриненко Анатолий Афанасьевич – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.
Email: lavrin_a@mail.ru.

Гольберг Григорий Юрьевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.
Email: gr_yu_g@mail.ru.

Хамзина Татьяна Анатольевна – ведущий инженер, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова Российской академии наук, Москва, Россия.
Email: bagrowa@bk.ru. ORCID 0000-0002-1281-9801

Anatoly A. Lavrinenko – DrSc (Eng.), Head of the Laboratory, Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Email: lavrin_a@mail.ru.

Grigory Yu. Golberg – DrSc (Eng.), Lead Researcher, Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Email: gr_yu_g@mail.ru

Tatiana A. Khamzina – Lead Engineer, Academician Melnikov Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.
Email: bagrowa@bk.ru. ORCID 0000-0002-1281-9801