

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.79
DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-3-27-41



СОСТОЯНИЕ ПРОЦЕССОВ СГУЩЕНИЯ И ОБЕЗВОЖИВАНИЯ ОТХОДОВ ФЛОТАЦИИ УГЛЕЙ

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю.

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

Аннотация. Работа выполнена с целью выявления наиболее перспективных направлений совершенствования процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей. Показано, что актуальность этой темы связана с тенденцией к увеличению объёма углей, обогащаемых флотацией, и содержания в них тонких частиц породных минералов, в том числе глинистых, что, в свою очередь, приводит к увеличению количества образующихся отходов флотации и возрастанию трудности их обезвоживания. С другой стороны, требования по охране окружающей среды и рациональному использованию природных ресурсов обуславливают целесообразность работы углеобогажительных фабрик с замкнутым водно-шламовым циклом, обеспечивающим получение осветлённой чистой воды для повторного использования на фабрике и твёрдой фазы обезвоженного осадка для последующего транспортирования и складирования в сухом виде. В статье приведены сведения о составе и физико-химических характеристиках отходов флотации, влияющих на показатели процессов сгущения и обезвоживания. Рассмотрены процессы сгущения суспензий отходов флотации в сгустителях: радиальных, цилиндрических, в том числе пастовое, и пластинчатых. Показана целесообразность применения радиальных сгустителей со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем для получения слива с возможно более низким содержанием твёрдой фазы и концентрированной сгущённой суспензии. Приведены сведения о процессах обезвоживания отходов флотации: фильтрованием на ленточных и камерных фильтр-прессах, вакуум-фильтрах, осадительных центрифугах. Указаны достоинства и недостатки рассмотренных методов обезвоживания. Показано, что перспективными способами интенсификации процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации являются: совместное применение коагулянтов и флокулянтов; оптимизация значений расхода флокулянтов и режима их перемешивания с суспензией, в том числе дробная подача; рециркуляция части слива в процессе сгущения.

Ключевые слова: отходы флотации углей, сгущение, обезвоживание, сгустители, фильтр-прессы, флокуляция

© Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., 2023

Для цитирования

Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Состояние процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №3. С. 27-41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-27-41>



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

THICKENING AND DEWATERING OF COAL FLOTATION TAILINGS

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu.

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

Abstract. This research was carried out to determine the most promising ways of improving thickening and dewatering of coal flotation tailings. It has been shown that the significance of this topic is associated with a trend towards increasing the volume of coal beneficiation by flotation, and the content of fine particles of rock minerals, including clay minerals, which, in turn, leads to an increase in flotation tailings and the difficulty of their dewatering. On the other hand, the requirements for environmental protection and rational use of natural resources make it feasible to operate coal preparation plants with a closed water-sludge cycle, which provides clarified clean water for reuse at the coal preparation plant, and a solid phase in the form of a dewatered cake for subsequent transportation and storage in a dry state. This paper provides information on the composition and physical and chemical properties of coal flotation tailings, influencing the performance of thickening and dewatering processes. The authors described a thickening process of suspensions of flotation tailings in thickeners: radial, cylindrical-conical, including paste, and lamella thickeners. The authors showed efficiency of radial thickeners with a fluidized bed and a sludge densifier for producing the overflow with minimum solids content and highly concentrated underflow. The article contains information on dewatering of coal flotation tailings: by filtration on belt and chamber press filters, vacuum filters, and solid bowl centrifuges. The authors mentioned the advantages and disadvantages of the said dewatering technologies and showed that the promising methods of intensifying the processes of thickening and dewatering of flotation tailings are a combined application of coagulants and flocculants, an optimized flow rate of flocculants and the mode of their mixing with a suspension, including fractional dosing, and recycling of some overflow during thickening.

Keywords: coal flotation tailings, thickening; dewatering; thickeners; press filters; flocculation

For citation

Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Thickening and Dewatering of Coal Flotation Tailings. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 3, pp. 27-41. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-3-27-41>

Введение

В настоящее время в связи с тенденцией увеличения объёма углей, направляемых на обогащение, и содержанием в них тонких частиц возрастает доля углей, особенно коксующихся марок, обогащаемых флотацией. Эти причины, а также ужесточение требований по охране окружающей среды, в свою очередь, актуализируют проблему повышения эффективности методов обезвоживания продуктов флотации, в том числе отходов, для того чтобы свести к минимуму вредные последствия для окружающей среды. Так как метод флотации применяют на 28-ми обогатительных фабриках (ОФ) России [1], то указанная проблема имеет существенное значение в масштабах угольной отрасли. С учетом того, что выход отходов флотации составляет порядка 5% от рядового угля, направляемого на обогащение [2], то количество твёрдой фазы этого материала, ежегодно образующегося на ОФ России, составляет ориентировочно 5-7 млн т.

Отходы флотации получают на ОФ непосредственно с флотационных машин в виде относительно малоконцентрированной суспензии (содержание твёрдой фазы, как правило, в пределах от 10 до 100 кг/м³). При этом объёмный расход такой суспензии весьма значителен, и на некоторых ОФ достигает 3000 м³/ч. Другими словами, более половины от общего объёма воды, циркулирующей на ОФ, приходится на суспензию отходов флотации. Поэтому её разделение с получением обезвоженной твёрдой фазы и осветленной воды для повторного использования в технологическом цикле представляет важную задачу для ОФ. Практика сброса отходов флотации в наружные илосборники, существовавшая вплоть до конца XX века, в настоящее время неприемлема, что обусловлено требованиями по охране окружающей среды. Поэтому вновь строящиеся ОФ проектируют с замкнутой водно-шламовой схемой, а на действующих предприятиях осуществляют реконструкцию схемы для её замыкания. Такие схемы исключают жидкие выбросы в окружающую сре-

ду, предусматривают глубокое (с применением флокулянтов) осветление отходов флотации с направлением осветленной воды в технологическую схему ОФ и обезвоживание твёрдой фазы с получением осадка, пригодного для последующего транспортирования и складирования в породном отвале [3, 4]. Также известны альтернативные способы утилизации обезвоженных отходов флотации, включая использование в качестве:

- компонента закладки для заполнения пустых горных выработок [5];
- сырья для производства строительных материалов [6, 7];
- сырья для получения германия, редких, рассеянных и других потенциально ценных элементов [8];
- сырья для производства сорбентов [9].

В связи с вышеизложенным очевидно, что дальнейшее совершенствование технологического комплекса обогащения углей немислимо без повышения эффективности процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей.

Целью настоящей работы является выявление наиболее перспективных направлений совершенствования процессов сгущения и обезвоживания отходов флотации углей с учетом их состава и свойств, а также дальнейшей утилизации твердой фазы.

Состав и свойства отходов флотации

На углеобогатительных фабриках непосредственно с флотационных машин получают относительно малоцентрированную суспензию отходов флотации: содержание твёрдой фазы, как правило, в пределах 10-50 кг/м³ [3, 4]. Поэтому для получения чистой воды и обезвоженной твёрдой фазы применяют, как правило, двухстадийную схему обработки, включающую последовательные операции:

- сгущение под действием силы тяжести с применением флокулянтов для получения чистой оборотной воды (слива) и сгущённой суспензии с содержанием твёрдой фазы порядка 200 кг/м³ и более;
- обезвоживание сгущённой суспензии фильтрованием или центрифугированием с применением флокулянтов, при этом получают осветленную воду и осадок, пригодный для транспортирования и складирования в сухом виде.

Для определения рациональных условий складирования отходов флотации и оценки возможности утилизации их как потенциально тех-

ногенное сырье необходимы данные по *минеральному составу твёрдой фазы*. Согласно [3, 10, 11] в составе отходов флотации содержатся: глины (41-92%), угольное вещество (до 17%), пирит (до 12%), карбонаты (до 6%). Вещественный состав отходов флотации представлен оксидами алюминия, кремния, железа, солями щелочных и щелочноземельных металлов [3]. Зольность находится в широких пределах – от 55 до 85%, как правило, 70-75% [4, 12]. С увеличением зольности, а также дисперсности твёрдой фазы возрастает трудность её обезвоживания.

Основой для разработки рациональных режимов сгущения и обезвоживания суспензий отходов флотации являются данные по *гранулометрическому составу твёрдой фазы*. Доля тонких частиц весьма значительна: выход класса крупностью менее 10 мкм составляет порядка 50-60%, а менее 1 мкм – 10-15% [9, 13, 14], что связано с высоким содержанием глинистых минералов, склонных к набуханию и деструкции в водной среде. Так как субмикронные частицы, в отличие от микронных, флокулируются по перикинетическому варианту, причём время этого процесса составляет несколько сотен секунд [14], то возможно загрязнение слива субмикронными частицами.

Для рационального выбора режима применения флокулянтов и коагулянтов существенное значение имеет *электрокинетический потенциал твердой фазы* ζ , значение которого необходимо для оценки агрегативной устойчивости суспензий отходов флотации. В слабокислой, нейтральной и щелочной средах ζ находится в области отрицательных значений [9]. Это обусловлено диссоциацией потенциалопределяющих функциональных групп, в основном гидроксильных и силанольных на поверхности глинистых частиц [15]. Значение ζ при естественном рН составляет $-(20...40)$ мВ. Зависимость ζ от рН, как правило, монотонно убывающая в область отрицательных значений, но при рН свыше 9 возможно некоторое уменьшение абсолютного значения; в целом суспензии отходов флотации рассматривают как агрегативно устойчивые [16].

Для обоснования эффективного использования флокулянтов и коагулянтов необходимы данные по *ионному составу водной фазы* суспензии отходов флотации. Он аналогичен составу оборотной воды углеобогатительных фабрик и включает, согласно [3], катионы калия, натрия, кальция, магния, хлорид-, сульфат- и гидрокарбонат-анионы. Суммарное содержание раство-

рённых веществ от 1,6 до 4,1 кг/м³, ионная сила от 0,02 до 0,07 г-ион/л. Расчётные данные, приведенные в работе [17], показывают, что с увеличением ионной силы при прочих равных условиях для частиц с абсолютным значением дзета-потенциала свыше 30 мВ значение потенциала поверхности уменьшается; видимо, это обусловлено сжатием двойного электрического слоя. В работе [18] указано на способность глинистых веществ в суспензии отходов флотации к набуханию и ионному обмену в водной среде, причём отмечено, что с увеличением концентрации катионов кальция уменьшается набухание и, соответственно, повышается эффективность обезвоживания суспензии.

Важное практическое значение для определения режимов транспортирования суспензий имеют их *реологические характеристики*. Согласно [19], суспензии тонкодисперсных отходов обогащения минерального сырья, в том числе углей, при сравнительно низких значениях концентрации твёрдой фазы C_T проявляют свойства ньютоновских жидкостей. С увеличением значения C_T наблюдается тенденция к проявлению псевдопластичных свойств. Причина этого, вероятно, заключается в образовании структур коагуляционного типа. При возрастании C_T свыше 18-20 мас.% эти суспензии приобретают свойства твердообразных псевдопластичных тел: при напряжении сдвига τ , меньшем по сравнению с предельным статическим значением τ_y , имеет место упругая деформация, а при большем – течение с уменьшающейся вязкостью. С ростом C_T от 18-20 до 28-30 мас.% значение τ_y увеличивается от 0 до 600-800 Па.

Общие принципы организации обработки отходов флотации на ОФ

Обработка отходов флотации на ОФ обусловлена необходимостью получения осветленной воды для повторного использования в технологическом цикле обогащения и обезвоженной твёрдой фазы в виде осадка, пригодного для транспортирования и складирования в сухом виде. Поскольку концентрация исходной суспензии относительно невелика, то для удаления большей части свободной воды наиболее экономически целесообразной операцией является сгущение под действием силы тяжести. В результате получают осветлённую воду (слив) и сгущённую суспензию, дальнейшая обработка которой зависит от содержания твёрдой фазы C_T :

– при сравнительно низких значениях C_T , порядка 200-400 кг/м³, осуществляется дальнейшее обезвоживание сгущённой суспензии фильтрованием или центрифугированием;

– при более высоких значениях C_T возможно направление сгущённой суспензии в породный отвал для сухого складирования.

Важнейшим условием эффективного разделения суспензии отходов флотации в этих операциях является применение флокулянтов. В настоящее время широко применяют реагенты отечественного и зарубежного производства марок «Праестол», «Технофлок», «Суперфлок» и ряд других. Практика работы ОФ показала [4], что для сгущения суспензий наиболее эффективны анионоактивные флокулянты с молярной массой выше 10^7 кг/кмоль и долей отрицательно заряженных групп порядка 30-60%; расход, как правило, до 100 г/т. В отдельных случаях после анионоактивного флокулянта предусматривают подачу катионоактивного с молярной массой $(3-10) \cdot 10^6$ кг/кмоль, долей положительно заряженных групп порядка 30-80% и расходом до 20 г/т. Для обезвоживания на ленточных фильтр-прессах общепринятой практикой является последовательная подача анионоактивного и катионоактивного флокулянтов с вышеуказанными свойствами, причём суммарный расход составляет от 300 до 1000 г/т. Рациональные значения расходов флокулянтов определяют опытным путём, как правило, в лабораторных условиях: для процесса сгущения – по скорости осаждения суспензии; для процессов обезвоживания фильтрованием – по времени капиллярного всасывания либо по удельному объёмному сопротивлению осадка; для центрифугирования – по влажности осадка и содержанию твёрдой фазы в фугате.

Сгущение отходов флотации

Суть процесса заключается в разделении исходной суспензии под действием силы тяжести на осветлённую воду и концентрированную суспензию с применением флокулянтов. На практике сгущение и осветление осуществляют одновременно в одном аппарате – сгустителе. Механизм процесса заключается в следующем. Макромолекулы флокулянта соединяют мостиковыми связями значительное количество частиц, порядка нескольких десятков и сотен, в результате чего образуются относительно крупные флокулы (диаметром порядка 50-500 мкм), быстро осаждающиеся под действием силы тя-

жести. Макромолекулы анионоактивных флокулянтов и частиц твёрдой фазы имеют одноименный (в данном случае отрицательный) заряд, поэтому закрепление макромолекул на частицах происходит за счёт притяжения отрицательно заряженных групп флокулянта катионами диффузной части двойного электрического слоя [20]. Существенной особенностью описываемого процесса является протекание флокуляции по двум различным вариантам [14]:

- ортокинетическому – для частиц крупностью свыше 1 мкм; взаимное перемещение частиц и макромолекул флокулянта происходит за счёт конвективного массопереноса, характерное время процесса – несколько секунд;

- перикинетическому – для субмикронных частиц, перемещающихся относительно макромолекул флокулянта под действием броуновского движения, характерное время процесса – сотни секунд. Поэтому если время пребывания суспензии в сгустителе меньше времени протекания перикинетического процесса, то существует вероятность извлечения субмикронных частиц в слив. В то же время последовательное применение двух флокулянтов различной природы (как правило, анионоактивного, а затем – катионоактивного) позволяет получить практически чистый слив.

В настоящее время отечественными и зарубежными производителями выпускаются сгустители следующих конструкций:

- радиальные;
- цилиндрические;
- пластинчатые.

Ведущие производители сгустителей: АО «Машзавод "Труд"» (Новосибирск, Россия); ОАО ПО «Иркутский завод тяжёлого машиностроения» (Иркутск, Россия); "FLShmidt & Co. A/S" (Дания-США); "Enviro Clear Company, Inc." (США), "WesTech Engineering, LLC" (США), "Metso Outotec Group" (Финляндия) и др.

Радиальные сгустители (РС) получили широкое распространение в отечественной и зарубежной практике углеобогащения. На ОФ России применяют, как правило, РС с диаметром сгустительного чана от 16 до 30 м [4], за рубежом – до 125 м [21]. Привод – центральный или периферический. Технологическая схема сгущения отходов флотации в РС включает: систему приготовления и дозирования растворов флокулянтов; собственно сгуститель; насосы для слива и для сгущённой суспензии. Согласно [4], значения технологических показателей ра-

боты РС с применением флокулянтов на ОФ Кузбасса составляют:

- удельная нагрузка по исходной суспензии – 0,5-1,5 м³/м²·ч;
- расход флокулянта – до 100 г/т;
- содержание твёрдой фазы: в сливе – до 10 кг/м³, в сгущённой суспензии 200-400 кг/м³;
- время пребывания суспензии в сгустителе – 0,5-2,0 ч.

РС сравнительно просты по конструкции. Благодаря сравнительно большому объёму время пребывания суспензии в сгустителе, как правило, достаточно для эффективного осветления; процесс сгущения в них поддаётся автоматизации. Существенным недостатком РС является большая занимаемая площадь и, как следствие, значительная материалоемкость. Вследствие относительно небольшой глубины сгустительного чана значение гидростатического давления не позволяет повысить содержание твёрдой фазы в сгущённой суспензии за счёт её уплотнения.

Цилиндрические сгустители (ЦКС) отличаются от радиальных большим отношением глубины к диаметру, благодаря этому обеспечивается более высокая степень сгущения суспензии за счёт уплотнения осадка в конической части сгустителя под действием гидростатического давления. Поэтому такие сгустители называются также сгустителями с осадкоуплотнителем. Диаметр выпускаемых в настоящее время ЦКС – до 24 м [22]. По сравнению с РС ЦКС обеспечивают возможность достижения более высоких значений удельной нагрузки – до 4 м³/м²·ч. В то же время очевидно, что поверхность осаждения сгустителя возрастает пропорционально квадрату диаметра чана. Поэтому в случаях, когда суммарный объёмный расход суспензии отходов флотации, поступающей на сгущение, превышает 1500-2000 м³/ч, более целесообразным представляется применение РС.

В отличие от РС, в ЦКС может быть реализован процесс пастового сгущения. Он заключается в получении сгущённой суспензии с максимальным возможным содержанием твёрдой фазы (порядка 40-60 % по массе) для того, чтобы исключить последующие операции механического обезвоживания суспензии [23]. Согласно [24], для этого применяют ЦКС с диаметром до 25 м. В ряде случаев предусматривается перемешивание сгущённой суспензии с отходами гравитационного обогащения углей.

Достоинства технологии пастового сгущения [25]:

- невысокие капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с технологиями, предусматривающими механическое обезвоживание осадка;

- возможность получения чистого слива;

- относительно небольшая площадь территорий для складирования отходов и меньшие потери воды по сравнению с технологическими схемами, предусматривающими сброс относительно малоконцентрированных суспензий отходов в илонакопители.

Недостатки:

- для получения сгущённого продукта с высокой концентрацией твёрдой фазы требуется значительное время пребывания суспензии в сгустителе – порядка нескольких часов; в условиях действующего производства это не всегда возможно, так как приводит к значительному снижению производительности сгустителей;

- сложность осуществления и высокие затраты энергии на транспортирование сгущённой суспензии в породный отвал, особенно на большие расстояния;

- применение этой технологии нецелесообразно для предприятий, на которых уже имеется оборудование для сгущения и обезвоживания отходов флотации.

Таким образом, применение технологии пастового сгущения ограничено. Оно может быть целесообразным для предприятий, расположенных в засушливых регионах, для которых характерен дефицит воды [25], а также в тех случаях, когда площадь территорий для складирования отходов ограничена, а расстояние от сгустителя до места складирования сравнительно небольшое (как правило, несколько сотен метров). В то же время большая часть ОФ России расположена в регионах, не испытывающих проблем с водоснабжением, также есть территории для размещения отходов; на многих ОФ технологические схемы предусматривают глубокое обезвоживание отходов флотации. Поэтому в России технология пастового сгущения не получила распространения.

Пластинчатые сгустители [27]. Принцип их работы заключается в том, что осаждение частиц твёрдой фазы суспензии происходит при ламинарном течении снизу вверх через пакет пластин, расположенных наклонно. Осевшие частицы двигаются по поверхностям пластин вниз, собираются в бункере, где происходит уплотне-

ние осадка, и удаляются в виде сгущённого продукта. Жидкая фаза суспензии, двигаясь вдоль пластин вверх, удаляется в виде слива. По сравнению с РС пластинчатые характеризуются следующими преимуществами: компактностью; возможностью достижения высоких значений удельной нагрузки по исходной суспензии – до $12 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$; невысокой материало- и энергоёмкостью. Недостатки: сложность в изготовлении; сравнительно высокое содержание твёрдой фазы в сливе из-за возможных турбулентных пульсаций при течении суспензии между пластинами.

Особую группу составляют *сгустители со взвешенным слоем*, этот принцип может быть реализован как для РС, так и для ЦКС.

Особенности конструкции РС со взвешенным слоем [3, 28]:

- загрузочное устройство заглублено на уровень, соответствующий нижней части зоны осаждения;

- привод гребкового устройства – центральный.

Принцип работы сгустителей со взвешенным слоем заключается в том, что благодаря заглублению загрузочного устройства частицы твёрдой фазы и образующиеся флоккулы находятся во взвешенном состоянии в средней части аппарата. Таким образом, суспензия фильтруется через взвешенный слой, это обеспечивает высокую степень чистоты слива, а также возможность увеличения удельной нагрузки по исходной суспензии ориентировочно в 1,5-2 раза. В то же время наличие взвешенного слоя затрудняет получение сгущённой суспензии с высоким содержанием твёрдой фазы. Поэтому радиальные сгустители со взвешенным слоем в некоторых случаях снабжают осадкоуплотнителем, то есть глубоким конусом, присоединенным к нижней части сгустительного чана. Такие сгустители характеризуются большей металлоёмкостью и высотой по сравнению с радиальными сгустителями традиционной конструкции. Но, по нашему мнению, они наиболее эффективны для сгущения отходов флотации при сравнительно высоких значениях удельной нагрузки по исходной суспензии в тех случаях, когда требуется получение одновременно и чистого слива, и сгущённой суспензии с относительно высоким содержанием твёрдой фазы. В качестве примера на **рис. 1** представлена схема устройства радиального сгустителя со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем, выпускаемого фирмой "Enviro Clear Company, Inc." (США) [29].

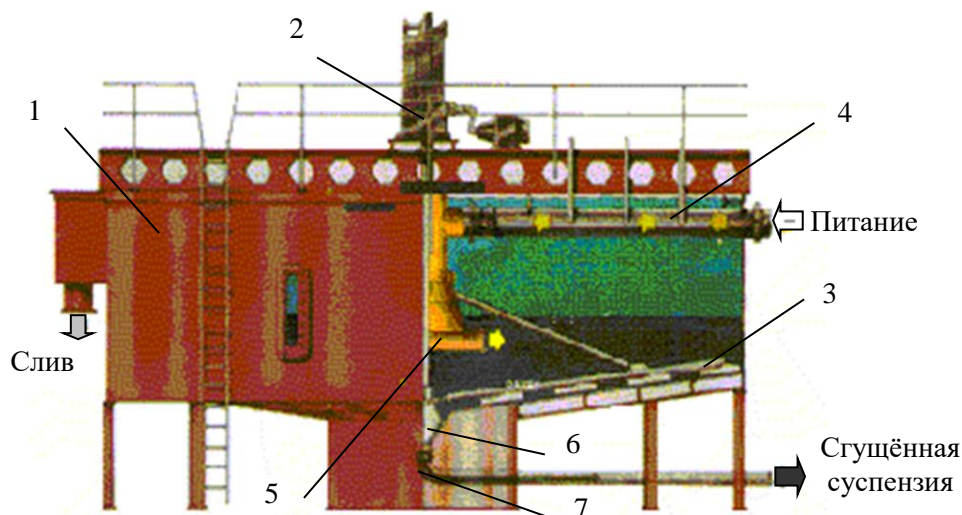


Рис. 1. Схема устройства радиального сгустителя со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем фирмы "Enviro Clear Company, Inc." [29]: 1 – сгустительный чан; 2 – привод; 3 – гребковое устройство; 4 – питающая труба; 5 – загрузочное устройство; 6 – осадкоуплотнитель; 7 – разгрузочное устройство

Fig. 1. A structure diagram of the radial thickener with a fluidized bed and a sludge densifier by Enviro-Clear Company, Inc. [29]: 1 is a thickening tank; 2 is a drive; 3 is revolving arms; 4 is a feed pipe; 5 is a charging device; 6 is a sludge densifier; 7 is a discharging device

Обезвоживание отходов флотации

Обезвоживание на *ленточных фильтр-прессах (ЛФП)* получило широкое распространение в практике углеобогащения с конца XX века [30]. Суть этого процесса заключается в механическом отжиме осадка, образующегося при удалении из суспензии свободной влаги и зажатого между двумя фильтрующими лентами, двигающимися синхронно, при прохождении через систему валков. Ведущие производители ЛФП: "Andritz AG" (Австрия); "FLShmidt & Co. A/S" (Дания-США); "Phoenix Process Equipment" (США); "ДАКТ Инжиниринг" (Россия) и ряд других. Технологическая схема предусматривает последовательное перемешивание сгущённой суспензии отходов флотации с растворами анионоактивного и катионоактивного флокулянтов в гладких трубопроводах или статических смесителях, и последующее обезвоживание на ЛФП.

Технологические показатели работы ЛФП при обезвоживании отходов флотации [3, 4, 24]:

- содержание твёрдой фазы в исходной суспензии – 300-550 кг/м³;
- суммарный расход флокулянтов – до 1000 г/т;
- удельная производительность по твёрдой фазе – до 6 т/ч на 1 м ширины ленты;
- влажность обезвоженного осадка – 35-45%;
- содержание твёрдой фазы в фильтрате – до 30 кг/м³.

Достоинства ЛФП: сравнительно низкие капитальные затраты; возможность получения обезвоженного осадка, пригодного для транспортирования и складирования в сухом виде; непрерывный режим работы; относительная простота устройства. Недостатки: значительные затраты на флокулянты; необходимость точного подбора и соблюдения реagentного режима.

Камерные фильтр-прессы (КФП) работают под давлением до 1,5 МПа, благодаря этому обеспечивается наиболее высокая (по сравнению с другими способами) степень обезвоживания отходов флотации: влажность осадка без просушки составляет 18-26% [31], с просушкой осадка воздухом или с отжимом при помощи диафрагм – порядка 20% и менее [32]. Для КФП, оснащённых диафрагмами, предусматривается подача воды под давлением, а для КФП с просушкой осадка – система подачи сжатого воздуха. К числу ведущих производителей КФП относятся: ООО «Гидротренд» (Екатеринбург, Россия); "Andritz AG" (Австрия); "FLShmidt & Co. A/S" (Дания-США); "JingJin Equipment Inc." (Китай) и др.

Технологические показатели работы КФП при обезвоживании отходов флотации [24, 32]:

- содержание твёрдой фазы в исходной суспензии – 25-45 мас.%;
- влажность обезвоженного осадка: без просушки – 18-26%, с просушкой воздухом или отжимом – 15-20%;

- удельная производительность по твёрдой фазе – 10-50 кг/м²·ч;
- содержание твёрдой фазы в фильтрате – до 10 кг/м³.

В России КФП эксплуатируют на ряде углеобогащительных предприятиях, в том числе ЦОФ «Печорская» (производства фирмы "McLanahan Corporation") [32], ОФ «Щедрухинская», ГОФ «Тайбинская», ГОФ «Коксовая» [33, 34].

Достоинства КФП [35]: высокая степень обезвоживания, в том числе для труднофильтруемых осадков; сравнительно невысокие затраты на флокулянты; устойчивый режим работы; высокое значение извлечения твёрдой фазы в осадок (не менее 98%); возможность получения чистого фильтрата. Недостатки: высокие капитальные затраты; периодический режим работы, что, в свою очередь, обуславливает низкую удельную производительность по твёрдой фазе; высокая металлоёмкость; большие габаритные размеры, особенно длина (до 15 м для КФП с площадью поверхности фильтрования порядка 1400 м²), что обуславливает сложность монтажа фильтров на ОФ. По нашему мнению, применение КФП целесообразно в тех случаях, когда требуется получение осадка с возможно более низкой влажностью и чистого фильтрата. При этом предпочтительнее крупнометражные КФП (с площадью поверхности фильтрования порядка 1000 м² и более), так как это позволит несколько снизить капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с фильтрами, имеющими меньшую площадь поверхности фильтрования.

Обезвоживание на *вакуум-фильтрах – дисковых (ДВФ) и барабанных (БВФ)* – не получило широкого распространения. Причина заключается в том, что отходы флотации образуют весьма труднофильтруемые осадки, для которых значение удельного объёмного сопротивления α_0 без применения флокулянтов составляет, как правило, не менее 10¹⁵ м⁻² [36]. Результаты расчётов показывают, что даже при минимальной частоте вращения дисков фильтра значение толщины осадка будет меньше минимального допустимого, составляющего порядка 7-8 мм для ДВФ и 4-5 мм для БВФ [36]. Применение флокулянтов не во всех случаях позволяет обеспечить эффективный режим работы ДВФ, так как значение α_0 при расходах флокулянта до 100 г/т снижается, как правило, примерно в 3-6 раз. При более высоких значениях расхода возможно возрастание α_0 вследствие стерической стабилизации частиц твёрдой фазы макромолекулами флокулянта, или

интенсивное осаждение флокул в ванне фильтра, что нарушает нормальный режим его работы. Поэтому применение ДВФ представляется целесообразным для сравнительно концентрированных и легкофильтруемых суспензий отходов. Так, по данным исследований фирмы "Bokela GmbH" (Германия) [37], для суспензии отходов обогащения, содержащей сравнительно крупные частицы (средний диаметр 40 мкм) и концентрацией твёрдой фазы 50% по массе, при обезвоживании без применения флокулянтов на ДВФ с площадью поверхности фильтрования 176 м² удельная производительность по твёрдой фазе составила 625 кг/м²·ч, влажность осадка – 19-22%. На основании результатов технико-экономического анализа авторами указанной работы был сделан вывод о том, что для исследованных отходов обезвоживание на ДВФ является наиболее экономически целесообразным по сравнению с применением ленточных вакуум-фильтров и камерных фильтр-прессов: значения удельных затрат на этот процесс (в австралийских долларах на тонну) составили 0,49 против соответственно 0,78 и 0,69.

Представляет интерес также технология обезвоживания отходов флотации на керамических ДВФ. Их рабочая поверхность изготовлена из специальной мелкопористой керамики. Обезвоживание суспензий происходит под действием капиллярных сил. Регенерация фильтрующей поверхности осуществляется азотной кислотой. Как правило, эти фильтры применяют для обезвоживания тонкодисперсных концентратов. По данным НТЦ «Бакор», при обезвоживании на таком фильтре суспензии каолина, близкой по свойствам к отходам флотации углей, влажность осадка составляет около 20%, а удельная производительность по твёрдой фазе – 400-600 кг/м²·ч [38]. Достоинства керамических фильтров: сравнительно высокая степень обезвоживания осадка; возможность получения чистого фильтрата и в меньших затратах энергии по сравнению с ДВФ. Недостатки: необходимость использования специальной, сравнительно дорогостоящей керамики и кислотоупорных конструкционных материалов; сложность эксплуатации. Поэтому целесообразность применения названных фильтров для обезвоживания отходов флотации углей не очевидна.

Обезвоживание с применением *осадительных центрифуг (ОЦ)* известно в практике обогащения углей с последней трети XX века [3, 39, 40], однако не получило широкого распространения по причине весьма значительного уноса твёрдой фа-

зы в фугат – до 40% при влажности обезвоженного осадка 28-34% [3]. Добавление флокулянтов позволяет снизить значение уноса примерно до 5-10%, но при этом значение влажности возрастает до 40-45%. В то же время по сравнению с фильтровальным оборудованием технологическая схема обезвоживания отходов флотации на ОЦ является более простой, так как не требуется вспомогательное оборудование. В работе [41] показано, что унос твёрдой фазы в фугат может быть сокращён путём применения коагулянтов.

Методы интенсификации процессов сгущения (осветления) и обезвоживания отходов флотации

В ряде случаев возникает необходимость повышения эффективности работы действующих сгустителей и фильтров путём усовершенствования конструкции и (или) технологии. В отличие от обезвоживания угольных флотационных концентратов, для которых характерна высокая гидрофобность частиц твёрдой фазы и требуется получение осадка с возможно более низкой влажностью, в случае отходов флотации, содержащих тонкодисперсные гидрофильные частицы, требуется обеспечить минимальное возможное содержание твёрдой фазы в сливе (фильтрате), при этом осадок обезвоживают до транспортируемого состояния.

Ниже описаны известные из отечественной и зарубежной литературы способы интенсификации указанных процессов:

1) *Оптимизация режима подачи флокулянтов и их перемешивания с суспензией.* Известно, что с увеличением степени турбулентности режима перемешивания суспензии с флокулянтom сокращается необходимое для перемешивания время. С другой стороны, возрастает степень механической деструкции флокул, что, в свою очередь, обуславливает снижение скорости осаждения. Отсюда очевидно, что при определённых параметрах гидродинамического режима перемешивания достигается оптимальная крупность флокул, что соответствует максимальному значению скорости осаждения и минимальному значению удельного объёмного сопротивления осадка. В работе [42], посвящённой исследованию режима перемешивания суспензии отходов флотации углей с флокулянтами в гладком трубопроводе и в статическом смесителе, было показано, что зависимость величины удельного объёмного сопротивления осадка α_0 от величины объёмного расхода суспензии имеет минимум, причём для статического смесителя минимальное значение α_0

примерно в 1,5 раза меньше по сравнению с гладким трубопроводом. Оптимальные значения параметров режима перемешивания определяют, как правило, экспериментально.

Для аналитического определения оптимального режима течения суспензии, обработанной флокулянтами, была предложена методика расчёта максимального допустимого значения скорости v , обеспечивающей сохранность флокул, при поступательном течении суспензий по трубопроводам в неизотропном турбулентном режиме [43]. В основу методики положена зависимость величины v от предельного динамического напряжения сдвига, которое, в свою очередь, зависит от среднего диаметра частиц твёрдой фазы, расхода флокулянта и его молярной массы.

Повышение эффективности перемешивания суспензий с флокулянтами может быть достигнуто путём применения компактных вращающихся мешалок, встраиваемых в трубопровод, за счёт возможности гибкого регулирования гидродинамического режима процесса путем изменения частоты вращения мешалки [44]. Также существует возможность интенсификации процессов сгущения и обезвоживания суспензий путём дробной подачи флокулянтов. По нашим данным, это обеспечивает снижение удельного объёмного сопротивления осадка на величину до 35% (рис. 2).

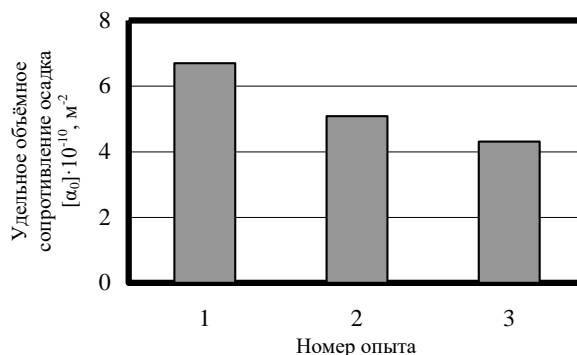


Рис. 2. Влияние дробной подачи флокулянтов на удельное объёмное сопротивление осадка при обезвоживании отходов флотации углей дренированием: 1 – 200 г/т анионоактивного и 400 г/т катионоактивного (единовременная подача); 2 – 100+100 г/т анионоактивного и 400 г/т катионоактивного; 3 – 100+100 г/т анионоактивного и 200+200 г/т катионоактивного

Fig. 2. Influence of fractional dosing of flocculants on volume resistance of the filter cake, when dewatering the coal flotation tailings by draining: 1 is 200 g/t anionic and 400 g/t cationic flocculants (charged at the same time); 2 is 100+100 g/t anionic and 400 g/t cationic flocculants; 3 is 100+100 g/t anionic and 200+200 g/t cationic flocculants

2) *Совместное применение коагулянтов и флокулянтов.* Данный способ широко применяется для очистки сточных вод [45]. В практике углеобогащения этот способ может быть оправдан при сгущении и обезвоживании отходов флотации с высоким содержанием тонкодисперсных глинистых частиц [11, 46]. Применяются коагулянты-электролиты (водорастворимые соли Al, Ca, Mg, Fe), реже – гетерокоагулянты. Как правило, коагулянт добавляют к суспензии перед подачей флокулянта для уменьшения отрицательного заряда частиц твёрдой фазы. Это, в свою очередь, создает благоприятные условия для последующего закрепления на поверхности частиц макромолекул флокулянтов. Известно также о применении алюминиевого коагулянта совместно с анионоактивным флокулянтом для обезвоживания суспензии отходов флотации на ЛФП [4]. Существенным недостатком описанного способа является значительный расход коагулянта (порядка 1-5 кг/т твёрдой фазы), что увеличивает текущие затраты. По нашему мнению, перспективным направлением интенсификации разделения суспензий является применение новых коагулянтов, содержащих титан, так как, по данным [47], коагулирующая способность ионов Ti^{4+} в несколько раз больше по сравнению с Al^{3+} . Это дает основание предполагать возможность эффективной реализации указанных процессов при сравнительно низких значениях расхода коагулянта.

3) *Рециркуляция определённой части слива* осуществляется с целью повышения эффективности флокуляции частиц твёрдой фазы суспензии и сокращения расхода флокулянта [48]. Этот способ основан на том, что с увеличением концентрации твёрдой фазы скорость осаждения частиц и их агрегатов снижается из-за стесненных условий. Поэтому разбавление исходной суспензии водой приводит к увеличению скорости осаждения твёрдой фазы. Кроме того, положительное влияние на агрегирование частиц твёрдой фазы может оказать остаточный флокулянт, содержащийся в сливе. Одним из вариантов реализации этого способа является разбавление исходной суспензии осветлённой водой из верхнего слоя сгустительного чана непосредственно в загрузочном устройстве, применяемое в конструкции радиальных сгустителей "Supaflo", выпускаемых фирмой "Metso Outotec Group" (Финляндия) [49].

Данные предварительных расчётов, выполненных авторами настоящей работы в соответствии с методикой, изложенной в [50], показали, что при содержании твёрдой фазы в суспензии

порядка 50 кг/м^3 и более становится заметным снижение скорости осаждения флокул с характерным диаметром 50-150 мкм за счёт стеснённых условий по сравнению со скоростью свободного осаждения (рис. 3). Поэтому разбавление может быть целесообразным для относительно концентрированных суспензий. Следует также принимать во внимание, что подача добавочной воды повышает нагрузку на сгуститель. Следовательно, количество воды для разбавления целесообразно определять таким образом, чтобы не превысить максимально допустимую удельную нагрузку на сгуститель.

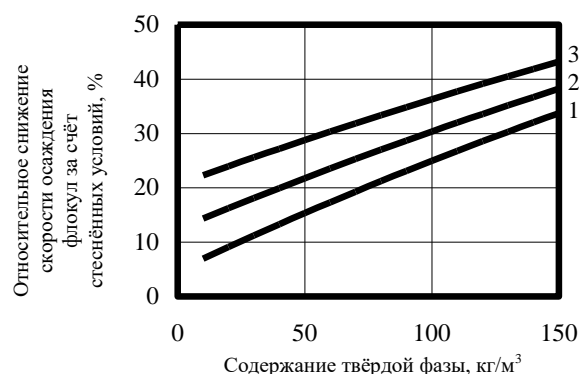


Рис. 3. Зависимость относительного снижения скорости осаждения флокул различного диаметра от содержания твёрдой фазы в суспензии за счёт стеснённых условий: 1, 2, 3 – диаметр флокул соответственно 50, 100 и 150 мкм

Fig. 3. Dependence between a relative decrease in the settling rate of flocs of various diameters and content of a solid phase in suspension due to limited space: 1, 2, 3 are flocule diameters of 50, 100 and 150 μm , respectively

4) *Применение ультразвука* было исследовано в лабораторных условиях для интенсификации сгущения отходов флотации медных руд [51]. Было установлено, что под действием ультразвука происходит уплотнение сгущённой суспензии, в результате чего содержание в ней твёрдой фазы возрастает ориентировочно на величину до 3 мас.% при частоте ультразвука 22 кГц. Этот способ пока не нашел применения в промышленности по причине высоких энергозатрат.

5) *Обезвоживание на вакуум-фильтрах с применением вспомогательного фильтрующего вещества, в частности намывного слоя* [52, с. 114-118]. Суть способа: на фильтрующую поверхность предварительно наносят слой осадка из вспомогательного порошкообразного материала

(например, древесной муки, или перлита, или диатомита) с диаметром частиц порядка 10-50 мкм или из волокнистого материала с диаметром волокон до 30 мкм. Далее осуществляют фильтрование суспензии отходов флотации с образованием слоя осадка на поверхности намывного слоя. Благодаря этому даже при сравнительно небольшой толщине образующегося осадка отходов флотации (порядка 1-3 мм) создаются вполне благоприятные условия для его съёма. Это достигается путём регулирования угла наклона ножа для съёма осадка таким образом, чтобы обеспечить удаление осадка отходов флотации, причём удаление слоя вспомогательного вещества было бы минимальным. Также создается возможность получения сравнительно чистого фильтрата. Применение возможно на БВФ, а также на ДВФ с ножевым съёмом осадка. Практическая реализация описанного метода ограничена относительно невысокой его производительностью, а также тем, что возрастают текущие затраты в связи с применением вспомогательного материала.

Выводы

1. Необходимость повышения эффективности разделения суспензий отходов флотации углей на твёрдую и жидкую фазы обусловлена требованиями по рациональному использованию водных ресурсов и охране окружающей среды. Этому в наибольшей мере отвечают замкнутые водно-шламовые схемы углеобогащительных фабрик, предусматривающие эффективное сгущение и обезвоживание суспензий отходов флотации с получением чистой воды для повторного использования в системе оборотного водоснабжения внутри фабрики и обезвоженного осадка, пригодного для транспортирования и складирования в сухом виде.

2. Процесс сгущения суспензий отходов флотации с применением флокулянтов целесообразно осуществлять в сгустителях со взвешенным слоем и осадкоуплотнителем, это позволяет получать слив с возможно более низким содержанием твёрдой фазы и концентрированную сгущённую суспензию.

3. Применение пастового сгущения целесообразно для регионов с дефицитом водных ресурсов в тех случаях, когда расстояние от сгустителя до места складирования отходов сравнительно небольшое.

4. Применение ленточных фильтр-прессов эффективно для обезвоживания сгущённых суспензий отходов флотации, различных по составу

и свойствам, при соблюдении режима подачи флокулянтов, обеспечивающего достижение минимального возможного значения удельного объёмного сопротивления осадка.

5. Обезвоживание с применением камерных фильтр-прессов целесообразно для труднофильтруемых суспензий отходов флотации в тех случаях, когда требуется получение осадка с минимальной возможной влажностью и чистого фильтрата.

6. Наиболее перспективные методы повышения эффективности сгущения и обезвоживания отходов флотации, обеспечивающие снижение отрицательного воздействия угольных обогащительных фабрик на окружающую среду:

- последовательное применение коагулянта, анионоактивного и катионоактивного флокулянтов;
- совершенствование процесса перемешивания суспензии отходов флотации с флокулянтами, включая применение вращающихся мешалок, встраиваемых в трубопровод, и дробную подачу флокулянтов;
- эффективность процесса сгущения может быть повышена путём рециркуляции части слива, при этом не должна быть превышена максимальная допустимая удельная нагрузка на сгуститель.

Список источников

1. Хамзина Т.А. Состояние флотации угольных шламов // Глобус. 2022. №4(73). С. 158-159.
2. Андреева Т.А. Отходы производства в угольной промышленности // X Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая», Кемерово, 24-27 апреля 2018 г. Кемерово: КузГТУ им. Т.Ф. Горбачёва, 2018. С. 53301.1-53301.4.
3. Техника и технология обогащения углей. Справочное пособие / под ред. В.А. Чантурия, А.Р. Моляко. 3-е изд. М.: Наука, 1995. 622 с.
4. Антипенко Л.А. Технологические регламенты обогащительных фабрик Кузнецкого бассейна. Прокопьевск: Прокопьевское полиграфическое производственное объединение, 2007. 463 с.
5. Rankine R., Pacheco M., Sivakugan N. Underground Mining with Backfills // Soils and Rocks. 2007, vol. 30, no. 2, pp. 93-101.
6. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production / Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R., Mansori M. // Minerals Engineering. 2017, vol. 107, pp. 123-138.
7. Использование отходов флотации битуминозных углей в производстве керамического кирпича / Лавриненко А.А., Свечникова Н.Ю., Коновницына Н.С., Игуменшева Е.А., Куклина О.В., Хасанзянова А.И. // Химия твердого топлива. 2018. №6. С. 64-68.
8. Шпирт М.Я., Артемьев В.Б., Силотин С.А. Использование твердых отходов добычи и перера-

- ботки углей. М.: Горное дело ООО «Киммерийский центр», 2013. 431 с.
9. Use of coal beneficiation tailings as solid sorbents in the treatment of nitrate-contaminated real wastewater / Nunes K.G.P., Illi J.C., Dávila I.V.J., Feris L.A. // *Applied Water Science*. 2020, vol. 10, no. 4, p. 14.
 10. Oruç F., Sabah E. Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings // *Proceeding of the XXIII International Mineral Processing Congress, 3-8 September 2006, Istanbul-Turkey*. Istanbul: IMPC, 2006, pp. 1192-1197.
 11. Innovation in dewatering process of flotation tailings by study of particle interaction in colloidal environment / Malíková P., Thomas J., Chromíková J., Vidlár J., Kupka J. // *Perspectives in Science*. 2016, vol. 7, pp. 171-177.
 12. Coal Flotation // Сайт 911metallurgist.com. URL: <https://www.911metallurgist.com/blog/coal-flotation>. (дата обращения: 20.04.2023).
 13. Effects of Energy Input on the Laboratory Column Flotation of Fine Coal / Yaowen Xing, Xiahui Gui, Jiongtian Liu, Yijun Cao & Yu Lu // *Separation Science and Technology*. 2015, vol. 50, pp. 2559-2567.
 14. Гольберг Г.Ю., Вигдергауз В.Е. Кинетические закономерности флокуляции тонкодисперсных продуктов обогащения: два механизма для частиц микронной и субмикронной крупности // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2011. №3. С. 90-96.
 15. Chorom M., Rengasamy P. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type // *European Journal of Soil Science*. 1995, vol. 46, pp. 657-665.
 16. Kumar S., Bhattacharya S., Mandre N.R. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014, vol. 114, no. 11, pp. 945-949.
 17. Моделирование процесса флокуляции тонкодисперсных отходов флотации углей в замкнутом водооборотном цикле / Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю., Палкин А.Б., Раджабов М.М. // *Вода: химия и экология*. 2016. №12. С. 22-28.
 18. De Kretser R., Scales P.J., Boger D.V. Improving clay-based tailings disposal: Case study on coal tailings // *American Institute of Chemical Engineering Journal*. 1996, vol. 43, no. 7, pp. 1894-1903.
 19. Sharma A., Goel P. Rheological Properties of Tailings Materials // *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2022, vol. 11, no. 7, pp. 80-85.
 20. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into Bridging Flocculation // *Macromol. Symp.* 2006, vol. 231, pp. 1-10.
 21. Review of equipment for mine waste: from the conventional thickener to the deep cone for paste product / Grima-Olmedo C., Butragueño-Muñoz J.A., Ramírez-Gómez A., Gómez-Limón Galindo D. // *DYNA Ingeniería e Industria*. 2015, vol. 90, pp. 359-365.
 22. Schoenbrunn F.R. A Short History of Deep Cone Thickener Development // *Paste 2007. Proceedings of the Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2007, pp. 51-55.
 23. Schoenbrunn F., Bach M., Miller M. The development of Paste Thickening and its Application to the minerals Industry; An Industry Review // *BHM berg- und Hüttenmännische Monatshefte. Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe, Maschinen- und Anlagentechnik*. 2015, vol. 160, no. 6, pp. 257-263.
 24. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailings. In: *The coal handbook. Towards cleaner production. V. 1: Coal production*. Ed. By D. Osborne. Woodhead Publishing Limited, 2013, 755 p.
 25. Risk assessment methodology for paste and thickened tailings. / Fernandez-Iglesias A., Correa A., Morton O., Laine J., Luiña R., Martinez G. // *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*, Australian Centre for Geomechanics, Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 167-180.
 26. Пастовое сгущение для экологической утилизации хвостов горного производства // Сайт Внедра.Ру. URL: www.vnedra.ru/tehnologii/pastovoe-sgushheniedlya-ekologichnoj-ut-1542/ (дата обращения: 20.04.2023).
 27. Lamella Thickeners // Сайт 911metallurgist.com. URL: <https://www.911metallurgist.com/lamella-thickeners/> (дата обращения: 20.04.2023).
 28. Бауман А.В. Сгущение и водооборот. Комплексные решения и «ноу-хау» // Сайт Гормашэкспорт. URL: https://gmexp.ru/netcat_files/multifile/2382/Sguschenie_i_vodooborot.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
 29. High Capacity Clarifier/Thickeners // Сайт Enviro-Clear Company, Inc. URL: <http://enviro-clear.com/clarifier-thickener/high-capacity/> (дата обращения: 20.04.2023).
 30. Сингх Б., Эрдман В. Обезвоживание флотохвостов на прессе с ситовой лентой // *Глюкауф*. 1978. Т. 114. №7. С. 25-30.
 31. Турченко В.К., Байдал В.А. Технология и оборудование для обогащения углей. М.: Недра, 1995. 359 с.
 32. Godwin P., Jenson C., Park T. Dewatering Fine Coal Tailings with Recessed Chamber or Membrane Plate Filter Press // *16th Australian Coal Preparation Conference*, 2017. 15 p.
 33. Установка камерных фильтр-прессов на обогатительных фабриках это следование высочайшим экологическим стандартам // Сайт Холдинга «ТопПром». URL: https://top-prom.ru/press-center/news/ustanovka_kamernih_filtypressov_na_obogatitelnyh_fabrikah_eto sledovanie_vysochajshim_ekologicheskimi_standartami (дата обращения: 20.04.2023).

34. Отделить воду от кека: в России растёт спрос на фильтр-прессы // Сайт dprom.online. URL: <https://dprom.online/mtindustry/v-rossii-rastet-sprosn-na-filtr-pressy/> (дата обращения: 20.04.2023).
35. Meiring S. Cake formation: three tailings filtration technologies using pressure // Paste 2021. The Proceedings of the 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered, Perth, 21-23 September 2021. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2021, pp. 91-104.
36. Брук О.Л. Фильтрация угольных суспензий. М.: Недра, 1978. 271 с.
37. Hahn J., Bott R., Langeloh T. Economical dewatering of tailings for mine backfill with high performance disc filters // Mine Fill 2014. Ed. by Y. Potvin and A.G. Grice. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014, pp. 41-48.
38. КДФ – керамический дисковый фильтр для обезвоживания концентратов с высокоэффективными фильтрующими элементами // Сайт НТЦ «Бакор». URL: http://www.ntcbakor.ru/kdf_rus.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
39. Борц М.А., Гупало Ю.П. Обезвоживание хвостов флотации угольных шламов. М.: Недра, 1972. 143 с.
40. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison // Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
41. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation / Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. // Separation and Purification Technology. 2021, vol. 259, no. 15, pp. 118-172.
42. Линёв Б.И., Гольберг Г.Ю., Панфилов П.Ф. К вопросу об эффективности перемешивания суспензий с флокулянтами в статических перемешивающих устройствах // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: МГГУ, 2005. Деп. 15.09.2005. № 429/12-05. 14 с.
43. Лавриненко А.А., Гольберг Г.Ю. Гидродинамический режим течения минеральных суспензий, обеспечивающий сохранность флокуляционных структур // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2019. №3. С. 106-112.
44. Floccmaster-System. Operation Instructions. Inline-Mixer AT // Сайт YUMPU. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/view/7326243/inline-mixer-at-www.jfknaerde-status-july-2008-jf-knauer-gmbh> (дата обращения: 20.04.2023).
45. Качалова Г.С. Коагуляционно-сорбционная очистка сточных вод // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. №2(78). С. 32-39.
46. A Review on Coagulation/Flocculation in Dewatering of Coal Slurry / Khazaie A., Mazarji M., Samali B. a.o. // Water. 2022, vol. 14, no. 918, 20 p.
47. Азопков С.В. Комплексные титаносодержащие коагулянты: синтез и применение: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2023. 18 с.
48. Banisi S., Yahyaei M. Feed Dilution-Based Design of a Thickener for Refuse Slurry of a Coal Preparation Plant // International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2008, vol. 28, no. 4, pp. 201-223.
49. Высокопроизводительный сгуститель – Metso Outotec // Сайт Metso Outotec Group. URL: <https://www.mogroup.com/ru/portfolio/high-rate-thickener/> (дата обращения: 20.04.2023).
50. Разделение гетерогенных систем. Осаждение, отстойники // Сайт РХТУ им. Д.И. Менделеева. URL: https://www.muotr.ru/upload/iblock/abe/Spring_14th_lecture.pdf (дата обращения: 20.04.2023).
51. Effect of Ultrasonic Frequency on Thickener Performance / Gongcheng Li, Shulong Liu, Zengsheng Wen, Guolei Liu, Yu Cui, Yajian Shao // Advances in Materials Science and Engineering. 2021. Article ID 6624704. 12 p.
52. Фильтрация технологических пульп / Белоглазов И.Н., Голубев В.О., Тихонов О.Н., Куукка Ю., Яскеляйнен Эд. М.: Руда и металлы, 2003. 320 с.

References

1. Khamzina T.A. Flotation of coal sludge. *Globus [Globe]*. 2022;(4(73)):158-159. (In Russ.)
2. Andreeva T.A. Production waste in the coal industry. X *Vserossiiskaya nauchno-prakticheskaya konferentsia molodykh uchenykh "Rossiya molodaya"* [The 10th All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists *Young Russia*]. Kemerovo: Gorbachev Kuzbass State Technical University, 2018, pp. 53301.1-53301.4. (In Russ.)
3. Chanturiya V.A., Molyavko A.R. *Tekhnika i tekhnologiya obogashcheniya ugley. Spravochnoe posobie* [Coal beneficiation process and equipment]. Moscow: Nauka, 1995, 622 p. (In Russ.)
4. Antipenko L.A. *Tekhnologicheskie reglamenty obogatitelnykh fabrik Kuznetskogo basseina* [Technological regulations for beneficiation plants of the Kuznetsk Basin]. Prokopenvsk: Prokopenvsk Polygraphic Production Association, 2007, 463 p. (In Russ.)
5. Rankine R., Pacheco M., Sivakugan N. Underground mining with backfills. *Soils and Rocks*. 2007;30(2): 93-101.
6. Taha Y., Benzaazoua M., Hakkou R., Mansori M. Coal mine wastes recycling for coal recovery and eco-friendly bricks production. *Minerals Engineering*. 2017;107:123-138.
7. Lavrinenko A.A., Svechnikova N.Yu., Konovnitsyna N.S., Igumensheva E.A., Kuklina O.V., Khasanzyanova A.I. Utilization of bituminous coal flotation wastes in manufacturing of ceramic bricks. *Khimiya tverdogo top-liva* [Solid Fuel Chemistry]. 2018;(6):64-68. (In Russ.)
8. Shpirt M.Ya., Artemiev V.B., Silyutin S.A. *Ispolzovanie tverdykh otkhodov dobychi i pererabotki ugley* [Utilisation of solid wastes of coal mining and processing]. Moscow: Gornoe Delo, 2013, 431 p. (In Russ.)
9. Nunes K.G.P., Illi J.C., Dávila I.V.J., Feris L.A. Use of coal beneficiation tailings as solid sorbents in the

- treatment of nitrate-contaminated real wastewater. *Applied Water Science*. 2020;10(4):14.
10. Oruç F., Sabah E. Effect of mixing conditions on flocculation performance of fine coal tailings. Proceedings of the 23rd International Mineral Processing Congress, 3-8 September 2006, Istanbul-Turkey. Istanbul: IMPC, 2006, pp. 1192-1197.
 11. Malíková P., Thomas J., Chromíková J., Vidlář J., Kupka J. Innovation in dewatering process of flotation tailings by study of particle interaction in colloidal environment. *Perspectives in Science*. 2016;7:171-177.
 12. Coal flotation. Available at: <https://www.911metallurgist.com/blog/coal-flotation>. (Accessed on April 20, 2023).
 13. Yaowen Xing, Xiahui Gui, Jiongtian Liu, Yijun Cao, Yu Lu. Effects of energy input on the laboratory column flotation of fine coal. *Separation Science and Technology*. 2015;50:2559-2567.
 14. Golberg G.Yu., Vigdergauz V.E. Kinetic regulations in flocculation of fine-dispersed washed products: two mechanisms for micron and submicron particles. *Journal of Mining Science*. 2011;47(3):376-381.
 15. Chorom M., Rengasamy P. Dispersion and zeta potential of pure clays as related to net particle charge under varying pH, electrolyte concentration and cation type. *European Journal of Soil Science*. 1995;46:657-665.
 16. Kumar S., Bhattacharya S., Mandre N.R. Characterization and flocculation studies of fine coal tailings. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2014;114(11):945-949.
 17. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu., Palkin A.B., Radzhabov M.M. Modeling of a flocculation process of fine coal flotation tailings in a closed water circulation cycle. *Voda: khimiya i ekologiya* [Water: Chemistry and Ecology]. 2016;(12):22-28. (In Russ.)
 18. De Kretser R., Scales P.J., Boger D.V. Improving clay-based tailings disposal: Case study on coal tailings. *American Institute of Chemical Engineering Journal*. 1996;43(7):1894-1903.
 19. Sharma A., Goel P. Rheological properties of tailings materials. *International Journal of Engineering Research & Technology*. 2022;11(7):80-85.
 20. Fellows C.M., Doherty W.O.S. Insights into bridging flocculation. *Macromol. Symp*. 2006;231:1-10.
 21. Grima-Olmedo C., Butragueño-Muñoz J.A., Ramírez-Gómez A., Gómez-Limón Galindo D. Review of equipment for mine waste: from the conventional thickener to the deep cone for paste product. *DYNA Ingeniería e Industria*. 2015;90:359-365.
 22. Schoenbrunn F.R. A short history of deep cone thickener development. *Paste 2007*. Proceedings of the Tenth International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2007, pp. 51-55.
 23. Schoenbrunn F., Bach M., Miller M. The development of paste thickening and its application to the minerals industry; An industry review. *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte. Zeitschrift für Rohstoffe, Geotechnik, Metallurgie, Werkstoffe, Maschinen- und Anlagentechnik*. 2015;160(6):257-263.
 24. Woodruff D., MacNamara L. Treatment of coal tailings. *The coal handbook. Towards cleaner production. V. 1: Coal production*. Ed. by D. Osborne. Woodhead Publishing Limited, 2013, 755 p.
 25. Fernandez-Iglesias A., Correa A., Morton O., Laine J., Luiña R., Martínez G. Risk assessment methodology for paste and thickened tailings. *Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 167-180.
 26. Paste thickening used for environmental recovery of mining tailings. Available at: www.vnedra.ru/tehnologii/pastovoe-sgushhenie-dlya-ekologichnoj-ut-1542/ (Accessed on April 20, 2023).
 27. Lamella thickeners. Available at: <https://www.911metallurgist.com/lamella-thickeners/> (Accessed on April 20, 2023).
 28. Bauman A.V. Thickening and water circulation. Integrated solutions and know how. Available at: https://gmexp.ru/netcat_files/multifile/2382/Sguschenie_i_vodooborot.pdf (Accessed on April 20, 2023).
 29. High capacity clarifier/thickeners. Available at: <http://enviro-clear.com/clarifier-thickener/high-capacity/> (Accessed on April 20, 2023).
 30. Singh B.K., Erdmann W. Das Entwässerung von Flotationsbergen mit einer Siebbandpresse. *Glückauf*. 1978;114(7):25-30.
 31. Turchenko V.K., Baidal V.A. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya obogashcheniya ugley* [Coal beneficiation technology and equipment]. Moscow: Nedra, 1995, 359 p. (In Russ.)
 32. Godwin P., Jenson C., Park T. Dewatering fine coal tailings with recessed chamber or membrane plate filter presses. *The 16th Australian Coal Preparation Conference*, 2017, 15 p.
 33. Installing chamber filter presses at beneficiation plants means compliance with the 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 April 20, 2023).
 34. Separating water from filter cakes: Russia witnesses a growing demand for filter presses. Available at: <https://dprom.online/mtindustry/v-rossii-rastet-sprosn-na-filtr-pressy/> (Accessed on April 20, 2023).
 35. Meiring S. Cake formation: three tailings filtration technologies using pressure. *Paste 2021*. The Proceedings of the 24th International Conference on Paste, Thickened and Filtered. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2021, pp. 91-104.
 36. Bruk O.L. *Filtrovaniye ugolnykh suspenzii* [Filtration of coal suspensions]. Moscow: Nedra, 1978, 271 p. (In Russ.)
 37. Hahn J., Bott R., Langeloh T. Economical dewatering of tailings for mine backfill with high performance

- disc filters. Mine Fill 2014. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2014, pp. 41-48.
38. CDF – a ceramic disk filter for dewatering concentrates with highly efficient filtering elements. Available at: http://www.ntcbakor.ru/kdf_rus.pdf (Accessed on April 20, 2023).
 39. Borts M.A., Gupalo Yu.P. *Obezvozhivanie khvostov flotatsii ugolnykh shlamov* [Dewatering of coal sludge flotation tailings]. Moscow: Nedra, 1972, 143 p. (In Russ.)
 40. Meiring S. Thickeners versus centrifuges – a coal tailings technical comparison. Paste 2015: Proceedings of the 18th International Seminar on Paste and Thickened Tailings. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2015, pp. 55-65.
 41. Nguyen C.V., Nguyen A.V., Doi A., Dinh E., Nguyen T.V., Ejtemaei M., Osborne D. Advanced solid-liquid separation for dewatering fine coal tailings by combining chemical reagents and solid bowl centrifugation. Separation and Purification Technology. 2021;259(15): 118-172.
 42. Linev B.I., Golberg G.Yu., Panfilov P.F. Efficiency of mixing suspensions with flocculants in static mixers. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. Moscow: Moscow State Mining University, 2005, 429/12-05, 14 p. (In Russ.)
 43. Lavrinenko A.A., Golberg G.Yu. Flow regime of mineral suspensions with preserved structure of flocs. Journal of Mining Science. 2019;(3):437-443.
 44. Floccmaster-System. Operation Instructions. Inline-Mixer AT. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/view/7326243/inline-mixer-at-wwwjfknauerde-status-july-2008-jf-knauer-gmbh> (Accessed on April 20, 2023).
 45. Kachalova G.S. Coagulation and sorption treatment of wastewater. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and Ecology: Problems and Solutions]. 2019;(2(78)):32-39. (In Russ.)
 46. Khazaie A., Mazarji M., Samali B. et al. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. Water. 2022;14(918):20.
 47. Azopkov S.V. *Kompleksnye titanoderzhashchie koagulyanty: sintez i primenenie: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Integrated titanium-containing coagulants: synthesis and application. Extended abstract of the Ph.D. dissertation]. Moscow, 2023, 18 p.
 48. Banisi S., Yahyaie M. Feed dilution-based design of a thickener for refuse slurry of a coal preparation plant. International Journal of Coal Preparation and Utilization. 2008;28(4):201-223.
 49. High-rate thickener Metso Outotec. Available at: <https://www.mogroup.com/ru/portfolio/high-rate-thickener/> (Accessed on April 20, 2023).
 50. Separation of heterogeneous systems. Settling, settlers. Available at: https://www.muctr.ru/upload/iblock/abe/Spring_14th_lecture.pdf (Accessed on April 20, 2023).
 51. Gongcheng Li, Shulong Liu, Zengsheng Wen, Guolei Liu, Yu Cui, Yajian Shao. Effect of ultrasonic frequency on thickener performance. Advances in Materials Science and Engineering. 2021; Article ID 6624704, 12 p.
 52. Beloglazov I.N., Golubev V.O., Tikhonov O.N., Kuukka Iu., Iaskeliainen E. *Filtrovaniye tekhnologicheskikh pulp* [Filtration of process sludge]. Moscow: Ore and Metals, 2003, 320 p. (In Russ.)

Поступила 03.05.2023; принята к публикации 06.05.2023; опубликована 25.09.2023
Submitted 03/05/2023; revised 06/05/2023; published 25/09/2023

Лавриненко Анатолий Афанасьевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, 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.

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