

УДК 621

**М. А. Васильева**, канд. техн. наук, доцент, **А. А. Волчихина**, аспирант  
Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия  
Тел. + 8(921)313-88-98, +8(952)218-56-11;  
E-mail: [saturn.sun@mail.ru](mailto:saturn.sun@mail.ru); [alexandravolchihina@yandex.ru](mailto:alexandravolchihina@yandex.ru)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНЕРЦИОННОГО СГУСТИТЕЛЯ

*Закладка выработанного пространства, осуществляется на месторождениях с подземной добычей, происходит, как правило, с образованием пустот между кровлей и закладочным массивом. Образовавшийся дозаклад может стать причиной аварии на месторождении. Поэтому данная статья поможет рассмотреть проблему образования пустот при закладочных работах, а также обратить особое внимание на использование сгустителя на базе мобильного закладочного комплекса для проведения дозакладочных работ.*

*В статье рассматривается моделирование работы инерционного сгустителя с построением распределения твердой фракции, скоростей воды и частиц гидросмеси в рабочем резервуаре. На основании полученных данных определены 4 режима работы сгустителя с выявлением рабочего режима.*

*Ключевые слова:* закладочное оборудование, мобильные установки, дозакладка пустот, гидро-транспорт, сгущение гидросмеси, подземная разработка, обратное водоснабжение, осветленная вода.

**M. A. Vasilyeva, A. A. Volchikhina**

## MODELING THE OPERATION OF AN INERTIAL THICKER

*Backfilling of mined-out space, carried out at deposits with underground mining, occurs, as a rule, with the formation of voids between the roof and backfilling array. The resulting under-mortgage can cause an accident at the field. Therefore, this article will help to consider the problem of void formation during stowing operations, as well as to pay special attention to the use of a thickener based on a mobile stowing complex for pre-stowing operations.*

*The article deals with the simulation of the operation of an inertial thickener with the construction of the distribution of the solid fraction, the velocities of water and slurry particles in the working reservoir. Based on the data obtained, 4 operating modes of the thickener were determined with the identification of the operating mode.*

*Keywords:* backfilling equipment, mobile installations, backfilling of voids, hydraulic transport, slurry thickening, underground mining, recycling water supply, clarified water.

### 1. Введение.

На данный момент на большинстве месторождений с подземной добычей, разработка ведется с закладкой выработанного пространства. Закладочные работы могут осуществляться при помощи: пневматической, гидравлической или механической закладки. Каждая из способов закладки обладает своими недостатками, к примеру: усадка массива, пылеобразование, большие габариты оборудования, большой объем воды [1, 2].

Процесс закладочных работ начинается с формирования гидросмеси на поверхности и самотечный транспорт до выработки по системе трубопроводов.

Закладочные работы в выработках производятся в три этапа: закладочные работы более густой смесью для формирования основания массива, закладочные работы смесью меньшей концентрации для формирования тела массива и закладочные работы густой смесью для формирования массива под кровлю выработки без образования пустот. Данная технология предусматривает полное заполнение выработки, но при подаче подготовленной смеси с поверхности, она расслаивается, и смесь любой концентрации к выработке подходит уже расслоившейся за счет потери гидросмесью своей кинетической энергии, что приводит к расслоению и потере гидросмесью своих рабочих пара-

метров [3]. Расслоившейся смесью производят «заливку» выработки, что приводит к усадке массива и разделению жидкой фазы от твердой фракции. Результатом проведения закладочных работ представленной смесью является образование пустот между сводом выработки и массивом [4, 5].

Образовавшиеся пустоты могут приводить к неоднократным опусканиям подрабатываемого массива горных пород, увеличению степени разрушения подрабатываемых массивов, возникновению зон повышенного горного давления, способные привести к горному удару, поэтому их необходимо ликвидировать, проводя работы по дозакладке образовавшихся полостей [6].

Существуют различные способы дозакладки образовавшихся пустот в зависимости от параметров недозаклада и имеющихся сетей горных выработок [7-10]. К таким способам относят дозакладку с вышележащих горизонтов по выработкам или скважинам, что часто приводит к их забутовке, невозможности контроля полноты заполнения и обладает высокой стоимостью работ. Вторым способом является применение различного мобильного оборудования. Но у них есть свои ограничения, к примеру ограничение по допустимой концентрации, высокое изнашивание насоса, большая масса, а также оборудование имеет короткий трубопровод, недостаточной дальности подачи, и применимость только для сухой закладки отдельного мобильного оборудования. Главным недостатком применению любого из выше описанных методов является то, что работы по дозакладке производятся, чаще всего той же расслоившейся смесью, циркулирующей в системе, которой производились закладочные работы. Для решения проблемы недозаклада предлагается применение существующей гидравлической смеси со сгущением непосредственно у закладываемой выработки для получения густой гидро-смеси с необходимыми характеристиками и передачи ее на насосное оборудование.

## **2. Материалы и методы.**

Существуют сгустители, в которых для процесса сгущения гетерогенной среды используются гравитационный, фильтрационный или инерционный принцип осаждения твердого компонента, однако при изучении конструкции этих устройств было выявлено три существенных недостатка: значительные габариты оборудования характеризуются низкой скоростью осаждения и большой длиной осаждения, что способствует большим затратам на время осаждения, наличие высокоизнашиваемых конструктивных элементов сгустителей (лопасти, перегородки, направляющие и тд) время работы, необходимость подведения дополнительных подпитывающих сетей, а также необходимость в очистном оборудовании для воды после сгустительных работ перед отводом в сеть городских канализаций или при повторном использовании [11]. Главным преимуществом инерционного сгустителя является отсутствие механических частей в конструкции для сгущения смеси, а также высокая эффективность сгущения [12, 13].

Основные задачи заключаются в организации оборотного водоснабжения на производстве, сгущение потока на завершающем этапе производства с обеспечением простоты интегрирования оборудования в существующую систему гидротранспорта потока.

Для решения проблемы научным коллективом Горного университета предложена конструкция инерционного сгустителя (рис.1), который может функционировать в условиях существующих промышленных производств и реализовать технологический процесс без капитальных изменений [14, 15].

Инерционный сгуститель состоит из впускного патрубка – 1, центральной камеры – 2 трапецидальной формы, где происходит аккумулялирование и процесс сгущения смеси, два гидродинамических профиля – 5, 6, после столкновения с которыми проис-

ходит инерционное осаждение твердого компонента, два выпускных патрубка (для осветленной воды и высококонцентрированной смеси) – 3, 4, ультразвуковыми поточными плотномерами – 7, 8, регистрирующие содержание твердого компонента в выпускных патрубках, шнек внизу резервуара для ликвидации уплотнения и слеживания сгущенной смеси, а также емкость накопления высококонцентрированной смеси – 9. В условиях экспериментального стенда емкость накопления включена в систему обратного водоснабжения – 11. В емкость после сгущения поступают осветленная вода и сгущенная смесь, происходит смешивание при помощи мешалок - 10, для достижения характеристик исходной гидравлической смеси, чтобы в дальнейшем смесь из емкости – накопителя поступила по системе трубопроводов обратно в центральный резервуар сгустителя для оценки эффективности работы оборудования.

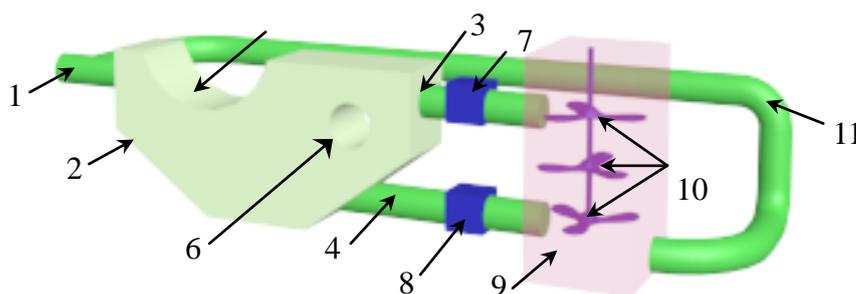


Рисунок 1. Конструкция инерционного сгустителя. 1 – входной патрубок; 2 – центральная камера; 3, 4 – выходные патрубки осветленной воды и сгущенной смеси; 5 – гидродинамический профиль; 6 – цилиндрический гидродинамический профиль; 7, 8 – ультразвуковые поточные плотномеры на выходном патрубке осветленной воды и сгущенной смеси; 9 – емкость – накопитель; 10 – мешалки; 11 – система обратного водоснабжения.

Работа инерционного сгустителя заключается в аккумуляции смеси, осаждении твердого компонента на дно резервуара с закладкой и отделении жидкой фазы для дальнейшего поступлением в обратное водоснабжение.

Основными характеристиками потока при взаимодействии с профилями являются: изменение скорости потока по времени, а также коэффициент подъемной силы и сопротивления. На рис. 2 представлено распределение скоростей потока после взаимодействия с первым и вторым гидродинамическими профилями.

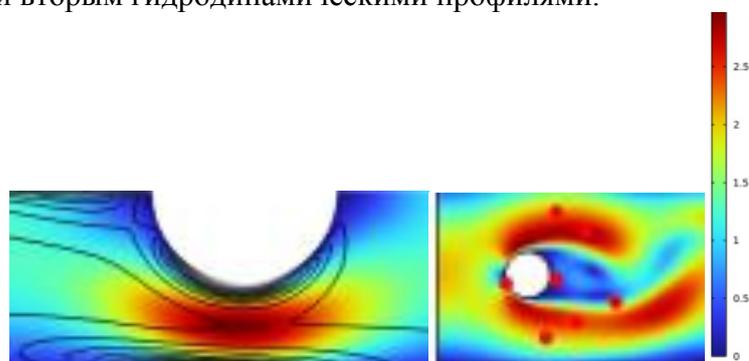


Рисунок 2. Распределение скоростей потока после взаимодействия с гидродинамическими профилями.

### 3. Моделирование работы оборудования

Для проверки гипотезы о работе инерционного сгустителя был выполнен численный эксперимент, позволивший построить картины распределения массовой доли и скоростей частиц, а также картины распределения скоростей и векторов скоростей воды в расчетной области (рис. 3-5).

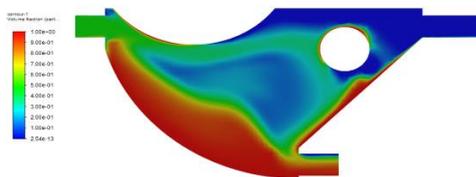


Рисунок 4. Распределение массовой доли частиц в рабочей зоне сгустителя.

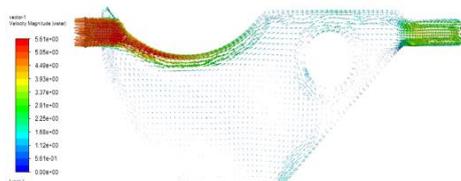


Рисунок 5. Распределение векторов скоростей воды в рабочей зоне сгустителя.

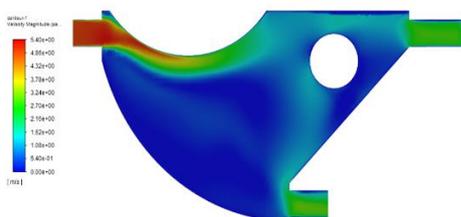


Рисунок 6. Распределение скоростей твердых частиц гидросмеси в рабочей зоне сгустителя.

На данных моделях можно проследить всю технологию процесса сгущения. Гидравлическая смесь с исходными параметрами поступает в резервуар, и взаимодействует с первым гидродинамическим профилем. Часть твердых частиц теряют скорость и осаждаются, сохранившая скорость часть твердых частиц движется дальше, сталкиваясь со вторым гидродинамическим профилем, что способствует потере скорости и осадению на стенки и дно резервуара, слой сгущенной смеси вдоль нижней части резервуара направляется в сливной патрубков, а осветленная вода в обратную систему.

Анализ картины распределения скоростей потока в расчетной области подтверждает механизм работы инерционного. Высокая скорость потока жидкой фазы на входе в рабочую зону сгустителя после столкновения с гидродинамическим отклоняющим профилем резко снижается, при этом из потока гидросмеси под действием сил инерции и сил тяжести интенсивно отделяется твердая фракция для дальнейшего транспортирования.

Оценка данных потока осветленной жидкости позволила выделить режимные участки работы сгустителя в зависимости от параметров гидросмеси на входе в рабочую зону и давления, создаваемого насосным агрегатом. Моделирование работы, показывает, что существует 4 основных режима работы сгустителя.

В начальном режиме (рис. 7) происходит подача гидравлической смеси и скопление ее в центральном резервуаре, осветленной воды практически нет.

В режиме наполнения (рис. 8) начинается процесс осадения и на дне резервуара уже образуется сгущенный участок. На данном этапе регистрируется выход твердого вещества плотномерами.

В рабочем режиме (рис. 9) частицы осаждаются за счет потери скорости при взаимодействии с двумя гидродинамическими профилями, формируя сгущенную

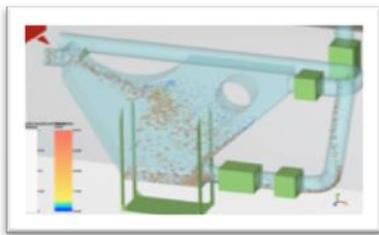


Рисунок 7. Начальный режим работы инерционного сгустителя

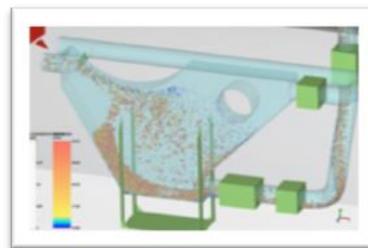


Рисунок 8. Режим наполнения.

область у дна резервуара, движущуюся к выходному патрубку, регистрируется поступление осветленной воды в обратную систему и высококонцентрированной смеси в насос.

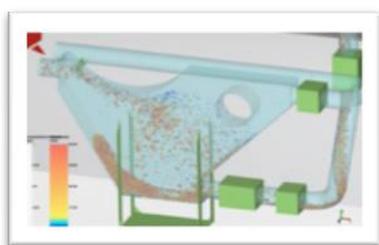


Рисунок 9. Рабочий режим сгустителя.

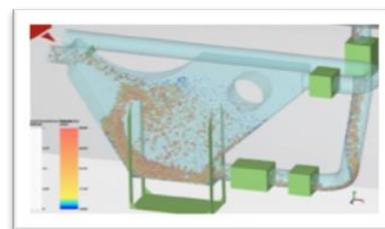


Рисунок 10. Режим выноса.

Режим выноса (рис. 10) показывает процесс взмучивания уже осевших твердых частиц с повторным осаждением, что замедляет процесс сгущения и происходит вынос твердой фазы в обратную систему с осветленной водой.

#### 4. Выводы и заключение.

На основании полученных результатов сделаны выводы:

1. Рабочая скорость гидравлической смеси составляет 1.5-3 м/с, при которой отсутствуют: обратный вынос твердой фракции с повторным осаждением и поступление большого числа твердой фракции в обратную систему водоснабжения.

2. Осветленная вода, отводящаяся сгустителем, возвращается в технологический процесс по системе оборотного водоснабжения, что снизит количество забираемой воды из городской системы. Водозабор будет осуществляться только для подпитки обратной сети.

3. Применение инерционного осаждения путем взаимодействия с двумя гидродинамическими профилями, которые снижают скорость движения частиц, повышают эффективность их осаждения, и увеличивают скорость, длину и время осаждения.

4. Инерционный сгуститель позволит получать высококонцентрированную смесь как готовый-итоговый продукт на завершающей стадии производства без внесения капитальных изменений в схему гидротранспорта смеси и снижение количества применяемых химических реагентов для сгущения смесей.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Цыгалова, М. Н. Закладочные работы в шахтах : справочник / под ред. Д. М. Бронникова. – М.: Недра, 1989. – 400 с.

2. Дзюба, С. В. Анализ технологий подземной разработки месторождений полезных ископаемых при ведении горных работ в сложных горно-геологических услови-

ях / С. В. Дзюба, Н. А. Шмелев, Н. В. Коваль // Геотехническая механика: сб. науч. тр. – Украина: Изд-во ИГТМ НАН, 2012. – Вып. 101. – С. 284–291.

3. Коликов, К. С. Закладка выработанного пространства как способ снижения негативного экологического воздействия при подземной угледобыче / К. С. Коликов, И. Э. Мазина, А. Г. Урузбиева // Записки Горного Института – 1987. – Т. 110. – С. 252–259.

4. Медведев, В. В. Совершенствование технологии закладочных работ при камерных системах разработки с закладкой / В. В. Медведев, В. В. Пакулов // Вестник ЗабГУ. – 2013. – №10(101). – С.25-31.

5. Пироженко, В. П. Разработка состава компонентов закладочной смеси на основе хвостов обогащения / В. П. Пироженко // Записки Горного Института – 2008. – Т. 178. – С. 77-81.

6. Шубин, А. А. Моделирование процесса ликвидации подземных пустот в условиях техногенной активизации / А. А. Шубин // Записки Горного Института – 2013. – Т. 204. – С. 101-104.

7. Qiang Zhang Overview of Solid Backfilling Technology Based on Coal-Waste Underground Separation in China / Qiang Zhang, Jixiong Zhang, Zhongya Wu, Yang Chen // Sustainability – 2019 – 11, 2118. – URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/7/2118>. (дата обращения: 11.02.2021). – Текст: электронный.

8. Krzysztof Skrzypkowski Compressibility of materials and backfilling mixtures with addition of solid wastes from flue-gas treatment and fly ashes / Krzysztof Skrzypkowski // XVIII Conference of PhD Students and Young Scientists Interdisciplinary Topics in Mining and Geology. – Kraków, Poland, 2018. – Vol. 71. – P. 1-6.

9. Xuan, D. Backfill mining practice in China coal mines / D. Xuan, J. Xu, W. Zhu // Journal of Mines, Metals and Fuels – India, 2013. – V. 61(7–8). – P. 225–234.

10. Сараскин, А. В. Технология закладки выработанного пространства смесями на основе отходов обогащения руд / А. В. Сараскин, А. А. Гоготин // Горный журнал – 2017. – Т. 9 – С. 41-45.

11. Туркин, И. С. Закладка выработанных пространств рудников с применением вертикальных сгустителей / И. С. Туркин, В. В. Олизаренко, Р. Х. Шарипов // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. науч. тр. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. – С. 206–210.

12. Васильева, М. А. Мультифизическая модель течения гетерогенного потока при движении по каналу переменного сечения / М. А. Васильева, С. Фёйт // Записки Горного Института. – 2017. – Т. 227. – С. 558-562.

13. Гамбарьян, Л. Г. Транспортирование твердеющих закладочных смесей по полиэтиленовым трубам / Л. Г. Гамбарьян // Записки Горного Института – 1987. – Т. 110. – С. 105-110.

14. Мисюля, Д. И. Конструктивные особенности раскручивающих устройств для циклонов / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Химия и технология неорганических веществ. Труды БГТУ. – 2011. – №3. – С. 153-161.

15. Васильева, М. А. оборудование и технологии для проведения работ по дозакладке выработанного пространства / М. А. Васильева, А. А. Волчихина, М. Д. Морозов // Горный информационно – Аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 133–144. – DOI 0.25018/0236\_1493\_2021\_4\_7\_39/.

Поступила в редколлегию 27.03.2022 г.