

изделий // Строительные материалы. – 2004. – № 12. – С. 38–39.

5. Перепелкин К.Е. Армирующие волокна и волокнистые полимерные композиты. – СПб: Научные основы и технологии, 2009. – 380 с.

6. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции. – М.: Химия, 1982. – 230 с.

*Работа выполнена в рамках междисциплинарного интеграционного проекта № 27 «Научные основы создания наномодифицированных базальтовых композиционных материалов с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами» программы V.37 РАН.*

**Васильева Алина Анатольевна**, аспирантка Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ), 656038, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, моб. тел. 8 924 591 40 62

**Лебедев Михаил Петрович**, директор Феде-

рального государственного бюджетного учреждения науки Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФТПС СО РАН), чл.-к. РАН, 677980, Республика Саха, г. Якутск, ул. Октябрьская, 1, тел. (411-2) 39-06-01, e-mail: m.p.lebedev@prez.ysn.ru

**Кычкин Анатолий Константинович**, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук (ИФТПС СО РАН), 677007, Республика Саха, г. Якутск, ул. Автоторожная, 20, тел. (411-2) 35-82-05, e-mail: kychkinplasma@mail.ru

**Татаринцева Ольга Сергеевна**, зав. лабораторией материаловедения минерального сырья, д-р техн. наук, доцент Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), 659322, Алтайский край, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1, тел. (3854) 30-58-82, e-mail: labmineral@mail.ru

УДК 628.3

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСАЖДЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГРАВИТАЦИОННЫХ И ЦЕНТРОБЕЖНЫХ СИЛ В ПРОЦЕССАХ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ФЛОТАЦИОННЫХ ВОД

А.Н. Блазнов<sup>1</sup>, В.В. Кырлан<sup>1</sup>, А.В. Фролов<sup>1</sup>, В.Е. Бажин<sup>1</sup>, Д.Б. Иванова<sup>2</sup>

Проведены гранулометрические исследования рудных хвостов. Изучен процесс разделения суспензии сточных флотационных вод под действием гравитационных и центробежных сил по объемному и массовому накоплению осадка.

Ключевые слова: седиментация, сточные флотационные воды, гранулометрический состав, гравитационное отстаивание, центробежное осаждение.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время важной народно-хозяйственной задачей является утилизация отходов промышленных предприятий, повторное использование их в производстве, создание замкнутых систем водопотребления и экологически безопасных технологий.

На рассматриваемой обогатительной фабрике Горного Алтая руда проходит стадии измельчения на щековой дробилке и шаровой мельнице. Затем продукт подается во флотационную машину, откуда концентрат поступает на сушку, а хвосты направляются в хвостохранилище, которое представляет собой прудок для отстаивания. В период проливных дождей и интенсивного таяния снега эта взвесь может

попасть в водоемы водораздела реки Бии, при этом происходит загрязнение окружающей среды и потеря продукта.

Для очистки сточных вод необходимо использовать оборудование, которое позволит уменьшить количество твердой фазы в выбросах до уровня, отвечающего требованиям нормативов по предельно допустимой концентрации. Основными методами разделения суспензии являются осаждение под действием гравитационных, инерционных сил, осаждение в центробежном поле и фильтрование [1,2].

Цель настоящей работы – исследование процесса очистки сточных флотационных вод под действием гравитационных и центробежных сил. Извлеченный компонент может ис-

пользоваться для заполнения пустот, образующихся в почве после извлечения руды, также для вторичной переработки и производства строительных материалов.

Для расчета и проектирования оборудования, предназначенного для очистки сточных вод, в литературе [3, 4] приведены следующие зависимости.

По закону Стокса постоянная скорость осаждения

$$\omega_0 = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18\mu_c} \quad (1)$$

где  $d$  - диаметр частиц;  $\rho$ ,  $\rho_c$  - соответственно плотность твердой и жидкой фазы;  $\mu_c$  - динамический коэффициент вязкости среды.

Поверхность осаждения

$$F_0 = V_0 \frac{x_2 - x_0}{3600\omega_0 x_2} \quad (2)$$

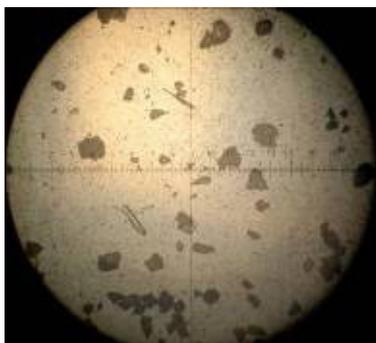
где  $x_0$  - концентрация суспензии до отстаивания в кг-с сухого осадка на 1 кг-с жидкой фазы;  $x_2$  - концентрация осадка в кг-с сухого

вещества на 1 кг-с жидкой фазы в осадке;  $V_0$  - количество жидкой фазы в суспензии.

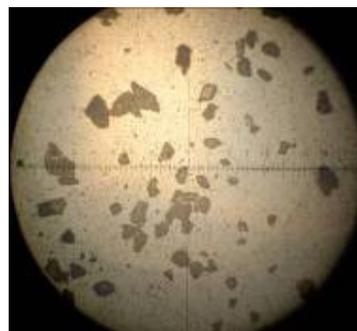
Приведенные в формулах величины, такие как диаметр частиц, плотность твердой фазы, концентрация суспензии и осадка, могут отличаться в 2–3 раза в зависимости от месторождения и технологического процесса дробления и обогащения руды для различных рудоперерабатывающих предприятий. Для их более точного определения были проведены экспериментальные исследования.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для определения диаметра частиц необходимы данные по гранулометрическому составу пульпы [5]. С целью определения дисперсного состава пульпы были отобраны пробы в месте сброса сточных вод в хвостохранилище. Измерение размеров частиц проводили оптическим методом с помощью оптического микроскопа и цифрового фотоаппарата. Некоторые характерные фотоснимки пульпы показаны на рисунках 1, 2.

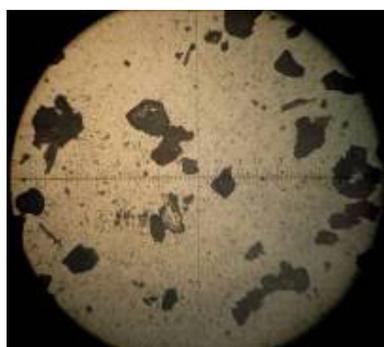


а



б

Рисунок 1 – Характерные фотографии исходной фракции: увеличение  $\times 100$ , цена деления 10 мкм



а



б

Рисунок 2 – Характерные фотографии крупной (а) и мелкой (б) фракции: увеличение  $\times 100$ , цена деления 10 мкм

Частицы дробленой руды имеют неправильную форму, разнообразны по размерам. Самые крупные частицы достигают размеров 200 мкм. Наиболее мелкие частицы имеют размеры до нескольких микрон. По фотоснимкам определили количество частиц, попавших в заданный интервал размеров.

Для расчета массообменных процессов и проектирования оборудования интерес представляет не количественное, а массовое распределение частиц по размерам. Массовое распределение пропорционально объемному, которое будем определять через  $d^3$ , если принять частицу близкой к форме шара.

Функция вероятности распределения при обработке экспериментальных данных определяется по выражению [6]:

$$F(d_q) = \frac{n_i d_{qi}^3}{\sum n_i d_{qi}^3}, \quad (3)$$

где  $n_i$  – число частиц, попавших в заданный интервал;  $d_{qi}$  – значение диаметра частицы дисперсной фазы, соответствующее середине интервала.

Экспериментальная плотность распределения вероятности может быть выражена как весовая функция:

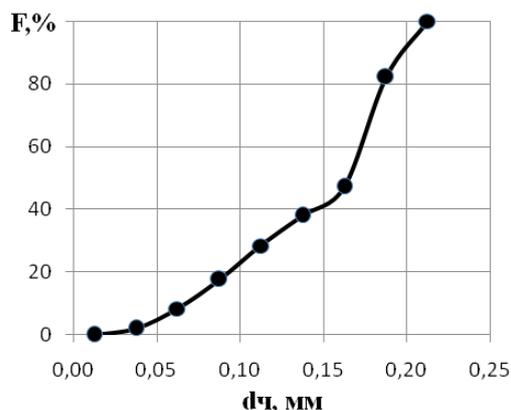
$$f(d_q) = \frac{n_i d_{qi}^3}{\Delta d_{qi} \sum n_i d_{qi}^3}, \quad (4)$$

где  $\Delta d_{qi}$  – ширина интервала.

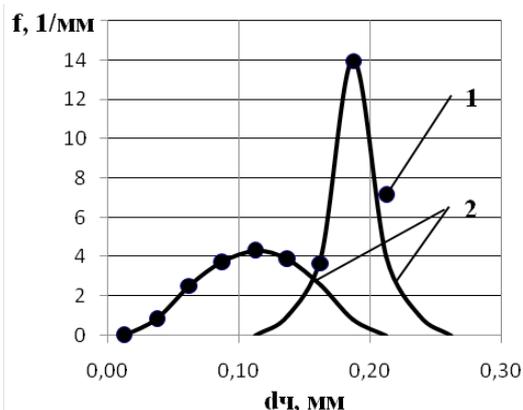
Осредненные результаты обработки экспериментальных данных по выражениям (1)-(2) приведены в таблице 1 и показаны на рисунке 3 в виде интегральной и дифференциальной весовой функции распределения.

Таблица 1 – Весовое распределение частиц по размерам

| Диапазон размеров частиц, мкм | 0-25  | 25-50 | 50-75 | 75-100 | 100-125 | 25-150 | 50-175 | 75-200 | свыше 200 |
|-------------------------------|-------|-------|-------|--------|---------|--------|--------|--------|-----------|
| Количество                    | 25240 | 422   | 278   | 149    | 81      | 40     | 23     | 57     | 20        |
| F, %                          | 4,38  | 1,98  | 6,03  | 8,87   | 10,25   | 9,24   | 8,77   | 33,40  | 17,06     |
| f, 1/мм                       | 1,75  | 0,79  | 2,41  | 3,55   | 4,10    | 3,70   | 3,51   | 13,36  | 6,82      |



а



б

Рисунок 3 – Интегральная (а) и дифференциальная (б) функции плотности распределения частиц по размерам: 1 – экспериментальные данные, 2 – расчетные зависимости по формуле (5)

В литературе для теоретической оценки плотности распределения используют законы нормального, бинормального распределения и другие [6]. Функция плотности нормального распределения определяется по формуле:

$$f(d_q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_q} \exp\left(-\frac{(d_{qi} - \bar{d}_q)^2}{2\sigma_q^2}\right), \quad (5)$$

где  $\bar{d}_q$  – средний диаметр частиц дисперсной фазы;  $\sigma_q$  – среднеквадратическое отклонение диаметров частиц дисперсной фазы от среднего значения.

Средний размер частицы в выражении (5) определяется по формуле:

$$\bar{d}_q = \frac{\sum n_i d_{qi}^4}{\sum n_i d_{qi}^3} \quad (6)$$

Величина квадрата среднеквадратического отклонения (дисперсия) определяется по формуле:

$$\sigma_q^2 = \frac{\sum n_i d_{qi}^5}{\sum n_i d_{qi}^3} - \left( \frac{\sum n_i d_{qi}^4}{\sum n_i d_{qi}^3} \right)^2 \quad (7)$$

Расчетная зависимость для нормального закона распределения показана на рисунке 3б. Анализ рисунка 3б показывает, что экспериментальное распределение частиц по размерам не соответствует теоретическому нормальному закону распределения, и содержит два максимума. Распределение в пределах обработанных проб воспроизводится, что исключает экспериментальную ошибку. Вероятно, эти два максимума могут быть обусловлены особенностями технологического процесса дробления руды на конкретном изучаемом производстве и соответствуют двум теоретическим нормальным законам распределения.

С помощью интегральной функции распределения (рисунок 3 а) удобно оценивать объемную долю частиц заданного размера. Например, наиболее крупные частицы размером от 50 до 200 мкм занимают по весу около 95 % всей фракции, а наиболее мелкие – 5 %. Проведенные гранулометрические исследования частиц пустой породы позволяют рекомендовать использование ее в качестве наполнителя для производства газобетона. При этом нет необходимости в доизмельчении частиц, а в хвостохранилищах только на отдельном рассматриваемом предприятии накоплены миллионы тонн пустой породы.

Плотность твердой фазы определяли методом вытеснения объема [7]. Предварительно взвешенные образцы руды помещали в градуированный сосуд с водой и измеряли объем образцов через объем вытесненной жидкости. Среднее значение плотности образца составило 2820 кг/м<sup>3</sup>.

Для определения концентрации суспензии до отстаивания были взяты три пробы, взвешены и высушены до постоянной массы. Определена средняя концентрация суспензии до отстаивания:

$$x_0 = \frac{Q_m}{Q_{жс}} = 0,42 \quad (8)$$

Аналогично определили концентрацию осадка в шламе:  $x_2 = 1,03$

Таким образом, экспериментально определены параметры, необходимые для расчета оборудования, предназначенного для очистки сточных вод под действием гравитационных и центробежных сил.

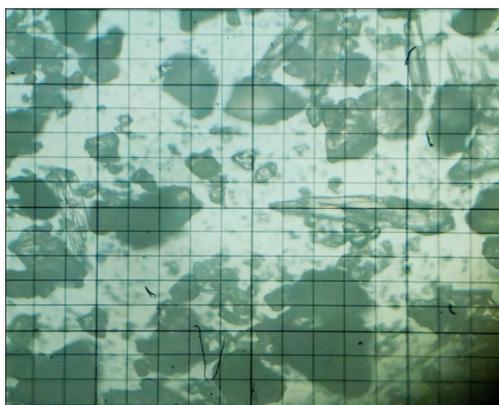
Исследования осаждения твердых частиц под действием гравитационных сил проводились по объемному и массовому накоплению осадка.

Для определения объемного накопления осадка наполняли сосуд пробой, наблюдали за накоплением осадка на дне. Можно выявить, что в первые минуты частицы с большой скоростью опускались на дно и осадок быстро накапливался. Спустя некоторое время нижний плотный осадок перестал накапливаться, а взвешенные частицы в верхней части сосуда начали отслаиваться от воды и образовывать пористый взвешенный слой, который по мере уплотнения сдвигался вниз. В результате можно было выделить 3 слоя, различных по цвету: нижний – более темный, средний – серый и верхний – прозрачная жидкость. Процесс осаждения частиц в покоящейся суспензии завершился через 24 часа.

Параллельно проводились исследования накопления массы осадка. Для этого наполняли суспензией сосуд объемом 200 мл. Через заданный интервал времени сливали жидкость до плотного осадка, отстаивали и повторяли процедуру. Из осадка отбирали пробу для гранулометрического анализа, затем высушивали до постоянной массы и взвешивали. Отобранные пробы под микроскопом фотографировали. Характерные фотографии фракций представлены на рисунке 4.

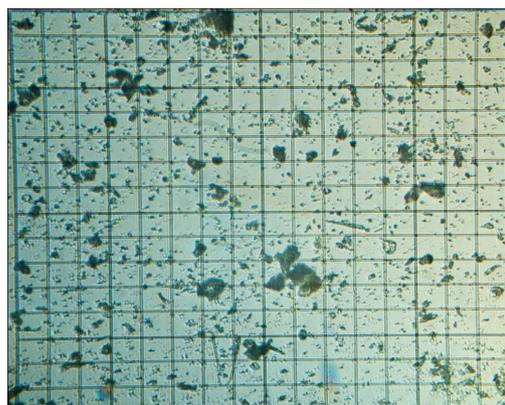
Можно заключить, что в первые секунды оседают крупные частицы, размерами от 50 до 200 мкм, а спустя 26 минут размер взвешенных частиц не превышает 40-50 мкм. По фотографиям определяли количество частиц, попавших в заданный интервал размеров, и рассчитывали весовую функцию распределения по методике, приведенной выше. Экспериментальные дифференциальные функции плотности распределения частиц по размерам приведены на рисунке 5.

При седиментационном исследовании выяснили, что основная масса твердого осадка выпадает в течение 180 секунд, взвешенные частицы до 50 мкм обладают относительной седиментационной устойчивостью и выпадают в осадок гораздо медленнее, при этом, образуя плотный осадок. Мелкая взвесь легко взмучивается, и в процессах отстаивания в производственных условиях неизбежен унос легкой мелкой фракции с жидкостью на уровне 5-7%.



а

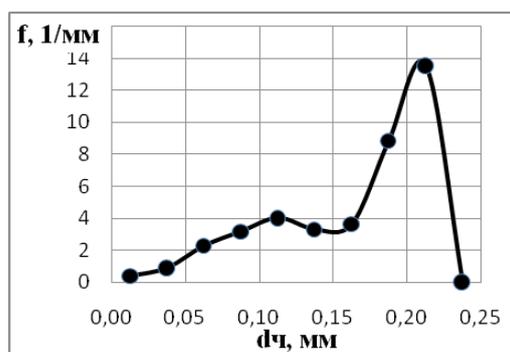
увеличение  $\times 70$ , сетка 50 мкм



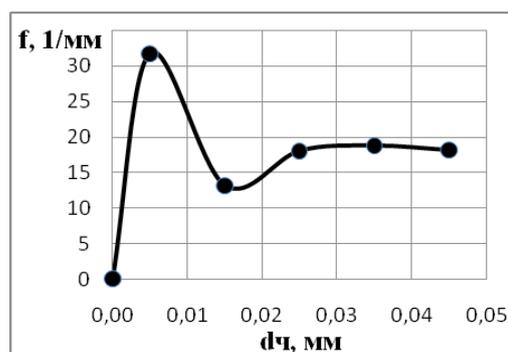
б

увеличение  $\times 140$ , сетка 25 мкм

Рисунок 4 –Характерные фотографии твердой фракции:  
а – отстаивание 30 секунд; б - отстаивание 1600 секунд



а



б

Рисунок 5 – Дифференциальная функция плотности распределения частиц по размерам:  
а – отстаивание 30 секунд; б - отстаивание 1600 секунд

На рисунке 6 а показаны результаты осаждения крупных частиц с образованием плотного осадка под действием гравитационных сил (без учета взвешенного слоя).

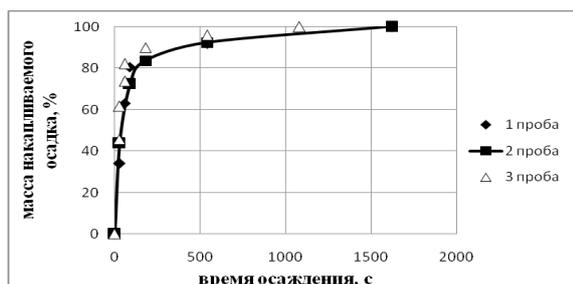
Исследования осаждения твердых частиц под действием центробежных сил проводились на стационарной лабораторной центрифуге [8]. Отобранные пробы подвергались последовательному центрифугированию при оборотах 500, 1000, 2000 об/мин. Контролировалось время осаждения, масса фугата, кон-

центрация твердой фазы в фугате, вес зависшей твердой фазы в фугате.

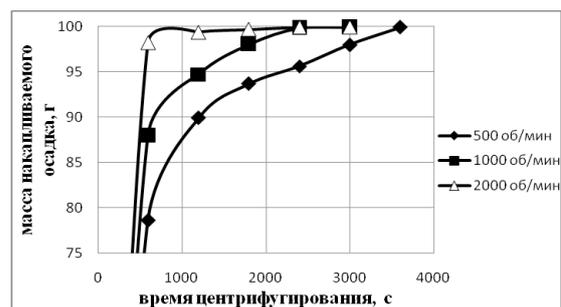
Было отмечено, что основная масса осадка (около 93 %) выпадает в первые секунды осаждения, а более мелкая фракция образует относительно устойчивую суспензию, которая разделяется в течение часа практически полностью.

На рисунке 6 б отображено осаждение в центрифуге частиц, образующих устойчивую суспензию (без учета крупных частиц).

## ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ



а



б

Рисунок 6 – Скорость осаждения крупных частиц под действием гравитационных (а) и мелких частиц – под действием центробежных (б) сил

Таким образом, экспериментальные исследования показали эффективность применения двух аппаратов для очистки сточных флотационных вод: отстойника – для удаления большей части крупных частиц, и центрифуги – для удаления мелких взвешенных частиц.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены гранулометрические исследования твердой фракции сточных вод флотационного обогащения комплексных руд. Экспериментально определены параметры суспензии – распределение частиц по размерам, плотность руды и содержание твердой части, необходимые для расчета осадительного оборудования.

На основании проведенных исследований и представленных результатов можно заключить, что очистку сточных флотационных вод более эффективно проводить двумя последовательными способами: гравитационным отстаиванием, в результате которого осаждается 93 – 95 % частиц более крупной фракции, затем центрифугированием, для осаждения оставшихся 5-7 % более мелких частиц.

С помощью проведенных исследований и с использованием предлагаемого оборудования можно получить шлам с нужной влажностью, что позволит использовать его в производстве газобетона, минуя стадию сушки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов. – 3-е изд. в 2-х кн.: часть 2. – Массообменные процессы и аппараты. – М.: Химия, 2002. – 368 с.: ил.
2. Гельперин Н. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: в 2-х книгах. – М.: Химия, 1981. – 812 с., ил.- (серия «Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии»).
3. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Ро-

манков, А. А. Носков; под ред. гл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – Изд. 9-е, перераб. и доп. - Л.: Химия, 1981. – 560 с.

4. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – 8-е изд., перераб. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

5. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. - 3-е. изд. - Л.: Химия. – 1987, 264 с.

6. Блазнов, А.Н. [и др.] Распределение пузырьков по размерам в жидкостно-газовых струйных аппаратах с удлиненной камерой смешения / А.Н. Блазнов, Ю.Н. Денисов, В.А. Куничан, Д.В. Чащилов // [Электронный ресурс] Исследовано в России, 14, 151-161, 2002. – Режим доступа: <http://zhurnal.apr.relarn.ru/articles/2002/014.pdf>.

7. Материаловедение: практикум / В.И. Гордиченко, Б.Ю. Давиденко, В.А. Исаев [и др.]; под ред. С.В. Ржевской.- М.: Логос, 2004.-272 с.

8. Коузов П.А., Скрыбина Л.Я. Методы определения физико – химических свойств промышленных пылей. – Л.: Химия, 1983. – 143 с, ил.

**Блазнов Алексей Николаевич**, профессор кафедры Машины и аппараты химических и пищевых производств, доктор технических наук, доцент Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул.Трофимова, 27, тел. 8-(3854) 43-52-99, сот 89059265800, blaznov74@mail.ru.

**Кырлан Виорика Викторовна**, студентка Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул.Трофимова, 27, тел. 89619760895, viorika-k@mail.ru.

**Фролов Александр Валерьевич**, доцент кафедры Производственная безопасность и управле-

## ПОЛУЧЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ

ние качеством, кандидат технических наук Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27, 8-(3854) 43-53-08, ata76@mail.ru.

**Бажин Василий Егорович**, профессор кафедры Машины и аппараты химических и пищевых производств, доктор технических наук, профессор Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного об-

разовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (БТИ АлтГТУ), 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27, 8-(3854) 43-52-99.

**Иванова Дарья Борисовна**, младший научный сотрудник лаборатории Процессов и аппаратов химических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), ул. Социалистическая, 1, Бийск, 659322, Россия. Тел. (3854) 30-18-69.