УДК 669.774

Д.Н.САФОНОВ, *аспирант, Juvus@yandex.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет
ХАККИНЕН АНТТИ, *профессор, Antti.Hakkinen@lut.fi*
КРАСЛАВСКИ АНЖИ, *профессор, Andrzej.Kraslawski@lut.fi*
Лаппеенрантский технологический университет, Финляндия
И.Н.БЕЛОГЛАЗОВ, *д-р техн. наук, профессор, Inbspsmi@mail.ru*
Санкт-Петербургский государственный горный университет
ПАЛМЕР ДЖЕЙСОН, *бизнес-директор, Jason.Palmer@larox.com*
ЭКБЕРГ БЪЯРНЕ, *старший менеджер, Bjarne.Ekberg@larox.com*
Корпорация Larox Oy, Турку, Финляндия

D.N.SAFONOV, *post-graduate student, Juvus@yandex.ru*
Saint Petersburg State Mining University
HÄKKINEN ANTTI, *professor, Antti.Hakkinen@lut.fi*
KRASLAWSKI ANDRZEJ, *professor, Andrzej.Kraslawski@lut.fi*
Lappeenranta University of Technology
I.N.BELOGLAZOV, *Dr. in eng. sc., professor, Inbspsmi@mail.ru*
Saint Petersburg State Mining University
PALMER JASON, *bisnes-director, Jason.Palmer@larox.com*
EKBERG BJARNE, *senior research, Bjarne.Ekberg@larox.com*
Larox Oy Co, Turku, Finland

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХОПРОНИЦАЕМОСТИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ФИЛЬТРУЕМОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СУСПЕНЗИЙ

В работе была сделана попытка применить Блэйн-метр для прямой оценки фильтруемости различных материалов. В теоретической части статьи описаны основные закономерности, связывающие Блэйн-индекс порошкового материала и удельное сопротивление осадка. Проведен ряд экспериментов с материалами, взятыми с реально действующих заводов. Для определения Блэйн-индекса использовался лабораторный Блэйн-метр, а для определения удельного сопротивления осадка проводились стандартные тесты на фильтруемость суспензии на лабораторном фильтре, работающем под давлением. В результате обработки экспериментальных данных и необходимых расчетов были получены зависимости, отражающие прямую связь между Блэйн-индексом и удельным сопротивлением осадка.

***Ключевые слова*:** Блэйн-индекс, Блэйн-метер, фильтрование под давлением, фильтруемость.

APPLICATION OF AIR-PERMEABILITY METHOD FOR FILTERABILITY PREDICTION OF DIFFERENT MATERIALS

The article is devoted to research work, in which an attempt was made to apply the Blaine-meter for direct assessment of filterability of different materials. In the theoretical part of the article the main laws linking the Blaine index of the powder material and the average specific cake resistance are described. A number of experiments with materials taken from actual operating plants were carried out. To determine the Blaine-index the laboratory Blaine-meter was used, and to de-

termine the average specific cake resistance standard tests of filterability on the batch pressure filter were carried out. As a result of processing experimental data and the necessary calculations direct relations between the Blaine-index and average specific cake resistance were obtained.
***Key words*:** Blaine-index, Blaine-meter, pressure filtration, filterability.

Введение. Стандартная методика расчета процесса фильтрования, определения условий его протекания и последующего ввода в эксплуатацию промышленного фильтра на обогатительных фабриках подразумевает предварительное проведение ряда тестов на фильтруемость суспензии. Подобные тесты обычно проводятся на специальных лабораторных пилотных фильтрах, отличающихся от промышленных установок лишь размерами и рабочим перепадом давлений. Для получения правдивых результатов тестирования необходимы такие же условия проведения фильтрования, как и на промышленном фильтре, т.е. использовать одинаковые фильтрующие перегородки и одну и ту же суспензию. В ряде случаев это оказывается непростой задачей, так как требует либо транспортировки и последующей наладки лабораторного пилотного фильтра на обогатительной фабрике, либо отправки достаточно большого количества суспензии непосредственно в лабораторию. Довольно часто это приводит к неоправданным дополнительным затратам времени, труда и материальных средств. Поэтому на сегодняшний день актуальна проблема интенсификации тестирования на фильтруемость. Поиск новых способов и методик тестирования ведется, прежде всего, в тех направлениях, которые позволят в будущем упростить этот процесс, снизить его стоимость, сократить сроки получения готовых результатов и уменьшить количество материалов, необходимых для проведения тестов.

Одним из направлений в решении задачи интенсификации тестирования является применение нового лабораторного оборудования, ранее не применявшегося для определения фильтруемости суспензий. Именно такой установкой является Блэйн-метр, измеряющий Блэйн-индекс, или удельную площадь поверхности частиц порошкового материала. Подобный метод измерения Блэйн-индекса получил широкое распространение в цементной промышленности для определения качества производимого цемента. Несмотря на некоторые недостатки, этим простым способом определения удельной площади поверхности частиц пользуются с начала 40-х годов прошлого столетия.

Удельная площадь поверхности частиц является одним из основных показателей крупности этих частиц порошкового материала. С другой стороны, крупность частиц, по сути, определяет удельное сопротивление осадка, образующегося в процессе фильтрования на фильтровальной перегородке. Таким образом можно проследить определенную связь между Блэйн-индексом и фильтруемостью различных суспензий.

Основная цель работы – определить возможность применения Блэйн-метра для оценки удельного сопротивления осадка, т.е. фильтруемости суспензии. В задачи исследования входило: проведение ряда экспериментов на Блэйн-метре и на лабораторном пилотном фильтре, работающем под давлением; обработка экспериментальных данных и построение необходимых графиков для наглядного представления результатов.

Научная новизна исследовательской работы заключается в том, что была предпринята первая попытка определения зависимости между удельным сопротивлением осадка и удельной площадью поверхности частиц порошкового материала, полученной напрямую с Блэйн-метра. В результате проведенных экспериментов и обработки экспериментальных данных были построены графики, выражающие эту зависимость. Принимая во внимание простоту работы с Блэйн-метром и высокую скорость получения конечных результатов тестирования, этот метод тестирования может быть с успехом использован для предварительной оценки фильтруемости перед проведением

стандартных полномасштабных пилотных испытаний на фильтруемость суспензии. Данный метод может быть единственно возможным при незначительном количестве материала для тестирования (до 100 г), когда проведение стандартного теста на фильтруемость невозможно.

Теоретические исследования. *Тестирование материалов на воздухопроницаемость.* Метод определения Блэйн-индекса основан на измерении времени, необходимого для прохождения определенного объема воздуха через известный объем исследуемого сыпучего материала. Это время используется в дальнейших расчетах для определения удельной площади поверхности частиц (квадратный метр в граммах в минус первой степени или квадратный метр в килограммах в минус первой степени). Подобные тесты проводятся на дешевом и легком в использовании Блэйн-метре. Важными преимуществами данного метода тестирования являются высокая скорость получения результатов и возможность использования очень малого количества пробы для тестирования (менее 100 г).

Методика тестирования порошков на Блэйн-метре подробно описана в стандарте ASTM C 207-07 (Стандартный метод определения удельной площади поверхности гидравлических цементов по воздухопроницаемости, Американская ассоциация тестирования, 2007) и состоит из нескольких этапов. Сначала проводится ряд калибровочных тестов с помощью стандартного порошка (портланд-цемента) с известной удельной площадью поверхности частиц и их распределением по крупности, затем – аналогичные эксперименты с тестируемым материалом. Зная время прохождения одинакового объема воздуха через стандартный и тестируемый порошки, упакованные с заранее известной пористостью, рассчитывается удельная площадь поверхности тестируемого материала.

Несмотря на очевидные преимущества определения удельной площади поверхности с помощью Блэйн-метра, этот метод имеет свои недостатки [2]. Многочисленные эксперименты показали, что аккуратность метода снижается при тестировании порошков, состоящих из очень мелких частиц. Было установлено, что метод практически неприменим при тестировании материалов с удельной площадью поверхности частиц более 500 $м^2$/кг из-за большой ненадежности.

Оценка фильтруемости суспензии. Фильтруемость суспензии целиком определяется свойствами ее твердой и жидкой фаз. К первичным относятся свойства, которые можно определить независимо друг от друга: физико-химические свойства фаз, размер и форма частиц, их распределение по крупности, свойства поверхности частиц и др. Первичные свойства определяют состояние суспензии, что оценивается такими характеристиками, как пористость будущего осадка, концентрация, гомогенность и степень дисперсии частиц. От состояния суспензии зависят макроскопические свойства целиком процесса фильтрования: удельное сопротивление осадка, скорость осаждения частиц суспензии и др. [3].

Наиболее важной характеристикой осадка фильтрования с теоретической точки зрения является его среднее удельное сопротивление. Причем эта характеристика определяет не только скорость движения жидкой фазы суспензии через образовавшийся осадок, но и скорости движения воздуха и промывающей воды через осадок на стадиях воздушной сушки и промывки соответственно. Наиболее широко применяемой моделью для описания движения жидкой фазы суспензии через слой осадка, учитывающей влияние размеров частиц, является уравнение Козени – Кармана [4]:

$$Q = \frac{\varepsilon^3}{K(1-\varepsilon)^2 SSA^2 \rho_S^2} \frac{\Delta pA}{\mu_L L}, \qquad (1)$$

где Q – объемная скорость движения жидкой фазы, $м^3 \cdot с^{-1}$; ε – локальная пористость осадка; Δp – разность давлений, Па; A – площадь фильтровальной перегородки, $м^2$; K – константа Козени; SSA – удельная площадь поверхности частиц осадка, $м^2 \cdot кг^{-1}$; ρ_S – плотность твердой фазы суспензии, $кг \cdot м^{-3}$; μ_L – вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с; L – толщина осадка, м.

Константа Козени зависит от структуры осадка. Для случайно сформированных несжимаемых осадков $K = 5$ [5, 6]. Уравнение (1) может быть преобразовано в форму, выражающую зависимость удельного сопротивления осадка от ряда факторов:

$$\alpha_{Av} = \frac{5\rho_S SSA^2(1-\varepsilon_{Av})}{\varepsilon_{Av}^3}, \qquad (2)$$

где α_{Av} – среднее удельное сопротивление осадка, м·кг$^{-1}$; ε_{Av} – средняя пористость осадка.

Уравнение (2) явно показывает квадратичную зависимость среднего удельного сопротивления осадка от удельной площади поверхности его частиц при постоянном значении средней пористости. Необходимо отметить, что последнее выражение может быть использовано для оценки значения α_{Av} только для несжимаемых или слабо сжимаемых осадков. В случае сильно сжимаемых осадков, которые изменяют свою структуру и пористость под действием перепада давления, формула неприменима [7].

Экспериментальное оборудование и методы. Цель проведения экспериментов – исследование возможности проявления на практике зависимости между удельной площадью поверхности, измеренной с помощью Блэйн-метра, и средним удельным сопротивлением осадка, определенным при проведении тестов на фильтруемость.

Всего было протестировано 11 различных материалов с разной крупностью частиц, формой и их распределением по размеру, а именно: пшеничный крахмал, угольный порошок, карбонат кальция, диоксид титана, синтетический магнетит, апатитовый концентрат, промышленный магнетит, железный концентрат, цинковый концентрат, медный концентрат и пиритный концентрат. Все материалы были взяты с ряда реально действующих обогатительных заводов Финляндии.

Лабораторное оборудование состояло из Блэйн-метра для оценки удельной площади поверхности порошковых материалов

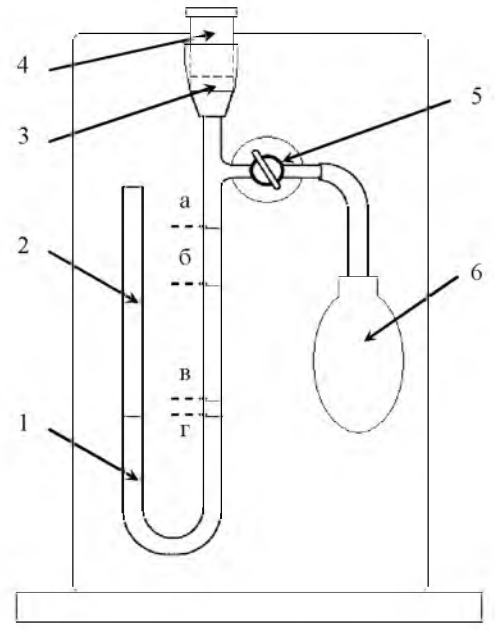


Рис.1. Схематическое изображение Блэйн-метра

1 – подкрашенная жидкость; 2 – *U*-образный манометр; 3 – ячейка с упакованным материалом; 4 – плунжер; 5 – стеклянный краник; 6 – резиновая груша; а, б, в, г – риски на трубке манометра

и лабораторного Нутч-фильтра для определения среднего удельного сопротивления осадков.

Измерение Блэйн-индекса порошковых материалов. Блэйн-метр представляет собой простой в использовании аппарат (рис.1). Непосредственной величиной, измеряемой на Блэйн-метре, является время, необходимое для прохождения определенного объема воздуха через упакованный порошковый материал с заранее известной пористостью. Тестирование материала производилось в два этапа. На первом этапе готовилась упаковка материала. Для этого в ячейку насыпался порошковый материал известной массы и утрамбовывался с помощью плунжера до необходимой пористости. На втором этапе осуществлялось пропускание воздуха через ячейку с материалом, предварительно закрепленную на одном из колен манометра. Измерялось время t, которое тратилось на опускание столбика подкрашенной жидкости от риски *б* до риски *в*, что свидетельствовало о прохождении постоянного объема воздуха через материал. Для одного материала проводилось три параллельных экспе-

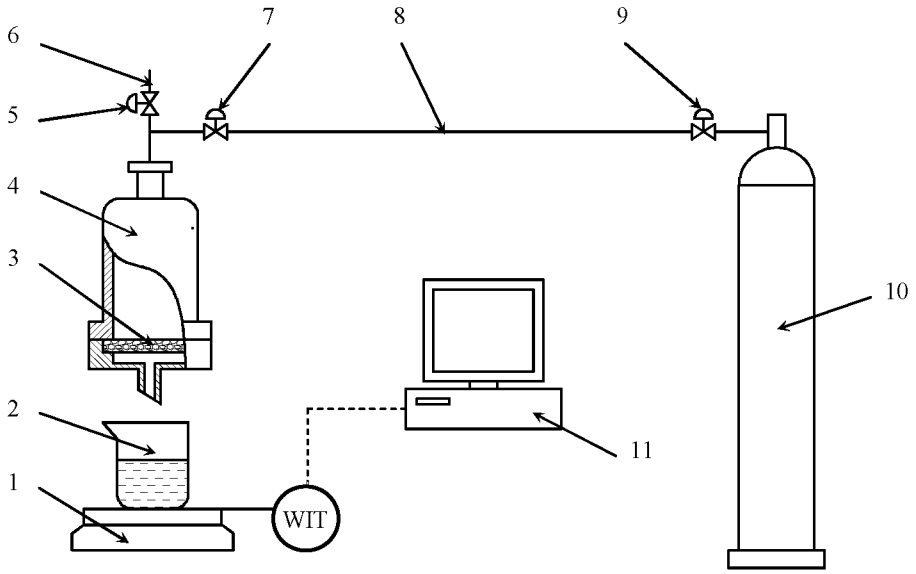


Рис.2. Система фильтрования

1 – лабораторные аналитические весы; 2 – емкость для фильтрата; 3 – заменяемая фильтровальная перегородка; 4 – лабораторный Нутч-фильтр; 5 – кран на патрубке для ввода суспензии; 6 – патрубок для ввода суспензии; 7 – кран на трубке подвода сжатого газа; 8 – трубка для подвода сжатого газа; 9 – вентиль для регулирования давления газа внутри фильтра; 10 – баллон с жатым газом (азотом); 11 – компьютер

римента. Для одного эксперимента готовилось пять упаковок материала с различной пористостью – от минимальной до максимально возможной. После проведения экспериментов рассчитывалась удельная площадь поверхности материала в соответствии с методикой, описанной в стандарте ASTM.

Проведение тестов на фильтруемость. Фильтрование суспензии осуществлялось на лабораторном Нутч-фильтре (рис.2).

Перед проведением тестов на фильтруемость готовилась суспензия определенной концентрации путем смешивания порошкового материала и воды. После тщательного перемешивания в фильтр через патрубок вливалось 300 мл суспензии. Сразу после этого открывался кран для подачи сжатого воздуха внутрь фильтра, где поддерживалось постоянное давление 2,0 бар. В процессе фильтрования твердые частицы задерживались на фильтровальной перегородке, а фильтрат выходил из фильтра и скапливался в емкости для фильтрата. После окончания процесса производились замеры некоторых параметров осадка и фильтрата, необходимых для определения основной характеристики осадка – среднего удельного сопротивления. Для этой цели использовалось классическое уравнение фильтрования при постоянном перепаде давления [1].

График зависимости среднего удельного сопротивления осадка от удельной площади поверхности для всех тестируемых материалов представлен на рис.3.

Согласно полученным экспериментальным данным для большинства тестируемых материалов прослеживается прямая связь между удельным сопротивлением осадка и удельной площадью поверхности материала. Аппроксимирующая прямая (пунктирная линия, рис.3) построена по квадратичному закону зависимости. Она явно показывает вполне ожидаемый результат – зависимость удельного сопротивления осадка от квадрата удельной площади поверхности [см. уравнение (2)]. Причем коэффициент корреляции имеет достаточно близкое к единице значение – 0,969.

Некоторые материалы, такие как диоксид титана, синтетический магнетит и пшеничный крахмал не подчиняются общей зависимости, характерной для всех остальных материалов. Первые два материала состояли из очень мелких частиц (удельная площадь поверхности намного больше 500 $м^2/кг$), что могло стать

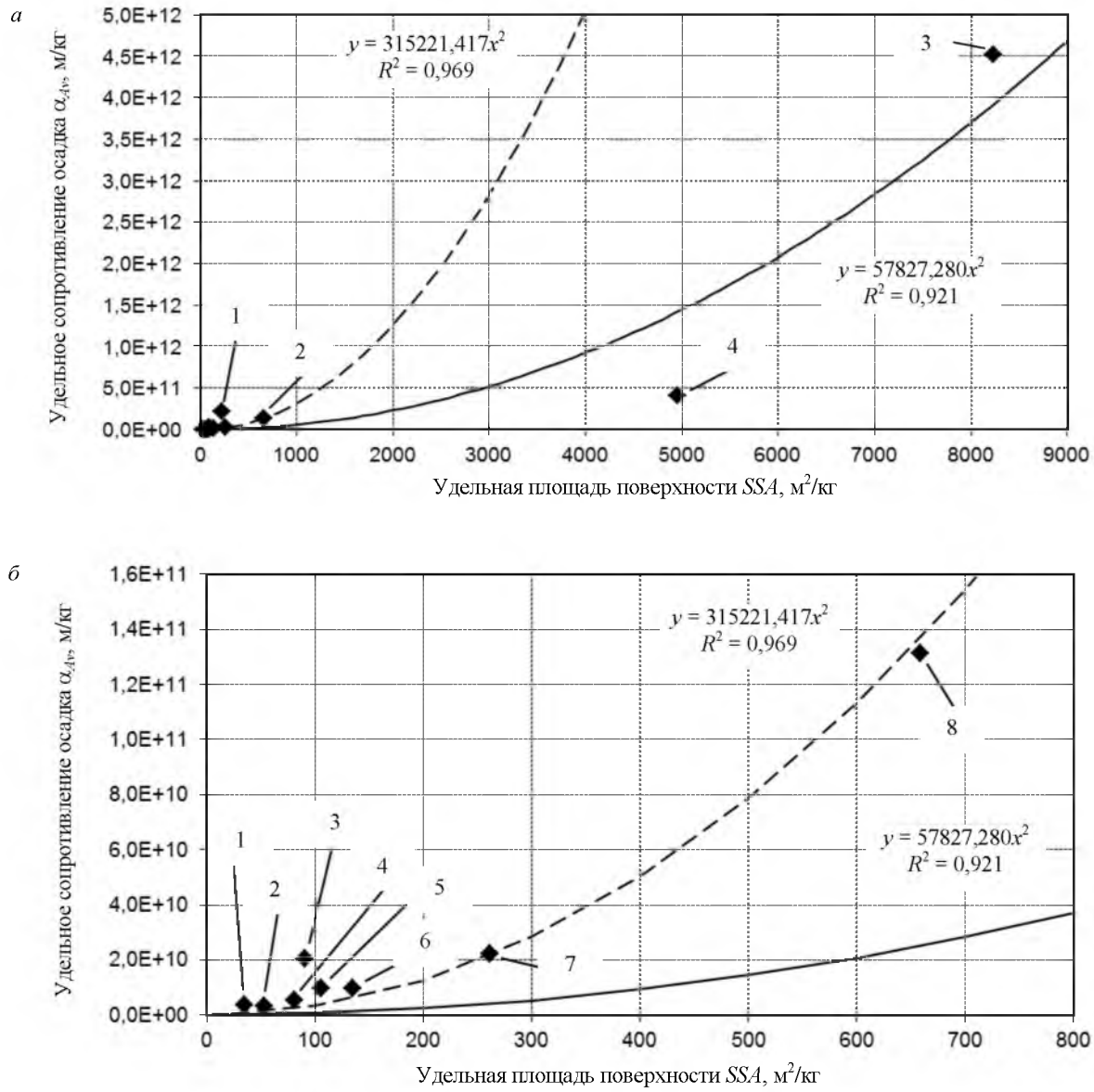


Рис.3. Зависимость удельного сопротивления осадка от удельной площади поверхности для перепада давления на фильтре 2,0 бар. Сплошная линия – с учетом всех материалов; пунктирная линия – без диоксида титана, синтетического магнетита и пшеничного крахмала: *а* – 1 – пшеничный крахмал; 2 – карбонат кальция; 3 – диоксид титана; 4 – синтетический магнетит; *б* – 1 – пиритный концентрат; 2 – апатитовый концентрат; 3 – железный концентрат; 4 – цинковый концентрат; 5 – медный концентрат; 6 – промышленный концентрат; 7 – угольный концентрат; 8 – карбонат кальция

причиной получения ненадежных результатов при тестировании на Блэйн-метре [2]. Пшеничный крахмал, также использованный в тестах, как органическое вещество во время фильтрования мог изменить свои свойства (например, размер и форму частиц), внеся большую погрешность в конечный результат измерения.

Для уточнения полученных в исследовательской работе зависимостей в дальнейшем предполагается провести тестирование с гораздо большим числом различных материалов. Интересным было бы тестирование материалов с более широким диапазоном удельной площади поверхности (до 1000 м²/кг).

Выводы

На основании литературного поиска и проведения экспериментов с большим количеством различных материалов можно сделать общий вывод о том, что методика измерения удельной площади поверхности материалов на Блэйн-метре может быть пригодна для оценки удельного сопротивления осадков большинства материалов, использованных в исследовательской работе.

Несмотря на некоторые ограничения определения Блэйн-индекса, эта техника является наиболее приемлемой для оценки фильтруемости суспензий в тех случаях, когда необходимо быстро получить конечный результат, не предполагается тратить значительные финансовые ресурсы на проведение экспериментов и при наличии очень малого количества материала для тестирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белоглазов И.Н.* Фильтрование технологических пульп / И.Н.Белоглазов, В.О.Голубев, О.Н.Тихонов. М.: Издательский дом «Руда и Металлы», 2003. 318 с.

2. *Potgieter J.H., Strydom C.A.* An investigation into the correlation between different surface area determination techniques applied to various limestone-related compounds // Cement and Concrete Research. 1996. Vol.26. N 11. P.1613-1617.

3. *Wakeman R.J.* The influence of particle properties on filtration // Separation and Purification Technology. 2007. N 58. P.234-241.

4. *Wakeman R.J., Tarleton E.S.* Solid/liquid Separation: Principles of Industrial Filtration. Elsevier, Oxford, UK, 2005. P.339.

5. *Grace H.P.* Resistance and compressibility of filter cakes // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 6. P.303-318.

6. *Tiller F.M.* The role of porosity in filtration. Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's law // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 9. P.467-479.

7. *Häkkinen A., Pöllanen K., Reinikainen S., Louhi-Kultanen M., Nystrom L.* Prediction of filtration characteristics by multivariate data analysis // Filtration. 2008. Vol.8. N 2. P.144-153.

REFERENCES

1. *Beloglazov I.N., Golubev V.O., Tichonov O.N.* Filtration of the technological suspensions. Moscow: Publishing house «Ore and metals», 2003. 320 p.

2. *Potgieter J.H., Strydom C.A.* An investigation into the correlation between different surface area determination techniques applied to various limestone-related compounds // Cement and Concrete Research. 1996. Vol.26. N 11. P.1613-1617.

3. *Wakeman R.J.* The influence of particle properties on filtration // Separation and Purification Technology. 2007. N 58. P.234-241.

4. *Wakeman R.J., Tarleton E.S.* Solid/liquid Separation: Principles of Industrial Filtration. Elsevier, Oxford, UK, 2005. P.339.

5. *Grace H.P.* Resistance and compressibility of filter cakes // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 6. P.303-318.

6. *Tiller F.M.* The role of porosity in filtration. Numerical methods for constant rate and constant pressure filtration based on Kozeny's law // Chemical Engineering Progress. 1953. Vol.49. N 9. P.467-479.

7. *Häkkinen A., Pöllanen K., Reinikainen S., Louhi-Kultanen M., Nystrom L.* Prediction of filtration characteristics by multivariate data analysis // Filtration. 2008. Vol.8. N 2. P.144-153.