

ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ

УДК 253.07

© Белоглазов И.И., Фирсов А.Ю., Сафонов Д.Н., 2013

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ В СОВРЕМЕННЫХ ФИЛЬТР-ПРЕССАХ

И.И. Белоглазов, А.Ю. Фирсов, Д.Н. Сафонов*

Национальный минерально-сырьевой университет «Горный»,
Санкт-Петербург, Россия,

*Лаппеенрантский технический университет, Лаппеенранта, Финляндия

В нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности фильтрация применяется в процессах депарафинации масел, производстве парафина, церезина, пластичных смазок, при очистке нефтепродуктов в контактной очистке масел, для улавливания технического углерода, отделения химических реактивов и особо чистых химических веществ и других продуктов от газов, отходящих от технологических установок распыляющего типа и печей кипящего слоя.

Повышение производительности и эффективности фильтров является одной из приоритетных задач, однако при ее решении необходимо не столько увеличивать габариты фильтра, сколько интенсифицировать процесс.

Современный высокоэффективный фильтр представляет собой сложнейший агрегат с множеством функций и режимов работы. Настройка такого фильтра и управление работой всех его подсистем – нелегкая задача, решение которой должно являться функцией системы автоматического управления, входящей в состав фильтра.

В данной работе основное внимание уделяется модели фильтрования суспензии при постоянном перепаде давления с образованием несжимаемого осадка. На практике такой процесс фильтрования является самым распространенным. Задача повышения эффективности фильтрования на фильтр-прессах в данной работе решалась в несколько этапов. Изначально возникла необходимость разработки математической модели фильтрования суспензии. Второй этап включал в себя проведение экспериментальных исследований с использованием лабораторного периодического нутч-фильтра. Заключительным этапом явилась разработка математической модели фильтрования в программном пакете Matlab.

Ключевые слова: фильтрование, пресс-фильтр, моделирование, системы автоматического управления, математическая модель.

AUTOMATION IMPROVEMENT IN MODERN PRESS-FILTERS

I.I. Beloglazov, A.Iu. Firsov, D.N. Safonov*

National Mineral Resources University (University of Mines),
Saint Petersburg, Russian Federation,

*Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland

In oil refining and petrochemical industry, filtration is applied in the processes of oil dewaxing, production of paraffin, ceresin, grease lubricants, petroleum product refining in contact oil filtration, carbon black recovery, separation of reactants and highly purified chemical substances and other products from gases coming from sputterers and fluid bed furnaces.

Improving performance and effectiveness of filters is one of the key issues, but the solutions should regard the process intensification rather than filter size modification.

A modern highly-effective filter is a sophisticated apparatus with plenty of functions and operation modes. The filter adjustment and operating all its subsystems is a challenging task, which should be delegated to an automated controller, being a filter component.

The present paper looks mainly at the suspension filtering model with a constant pressure difference and incompressible sediment formed. This is the most popular filtration technology to date. A problem of improving effectiveness of filter-press filtration was solved in several steps. At first, there appeared a need to develop a mathematical model of suspension filtering. The second step was related to experiments with a laboratory nutsch filter. The final stage permitted to develop the mathematical model of filtration in Matlab.

Keywords: filtration, press-filter, modeling, automatic control system, mathematical model.

Введение

В данной статье процесс фильтрации рассмотрен на примере фильтрации технологических пульп для предприятий цветной металлургии. Как правило, при фильтровании после многостадийного процесса измельчения и флотационного обогащения концентраты различных металлов содержат большое количество влаги, от которой необходимо избавиться. Часто перед конвективной сушкой, требующей больших затрат энергии, проводят процесс фильтрования для удаления основной массы жидкой фазы. Именно от эффективности установленных фильтров во многом зависит не только качество и количество продукта фильтрования, но и затраты на последующую сушку материала, если она все же необходима. Поэтому одной из основных задач на сегодняшний день является интенсификация работы различных фильтров.

Современный высокоэффективный фильтр – это сложнейший агрегат с множеством функций и режимов работы. Настройка такого фильтра и управление работой всех его подсистем – нелегкая задача. Несомненно, ее решение должно не лежать на плечах обслуживающего персонала, а являться функцией системы автоматического управления (САУ), входящей в состав фильтра.

Из всего многообразия фильтровального оборудования одним из самых удачных примеров реализаций соединения процесса фильтрования и автоматизированной системы управления на сегодняшний день являются автоматические вертикальные пресс-фильтры. Данный тип фильтров отличает ряд следующих преимуществ:

- 1) высокая производительность;
- 2) развитая поверхность фильтрования при малой занимаемой фильтром площади;
- 3) возможности регулирования толщины и влажности осадка как основных выходных характеристик фильтра;

4) незначительные затраты времени на вспомогательные операции, такие как промывка фильтровальной перегородки и разгрузки кека;

5) регенерация ткани без остановки работы фильтра;

6) полная автоматизация процесса фильтрования.

Одной из самых удачных реализаций автоматического вертикального пресс-фильтра являются фильтры финской фирмы Larox Oy. Компания выпускает фильтры Larox PF с площадью фильтрования от 1,6 до 144 м² и производительностью от 0,1 до 150 т/ч по сухому продукту. Они способны существенно сократить расходы на разделение суспензий (в ряде случаев более чем на 70 %).

Разработка математической модели фильтрования суспензии

Фильтрование нефтепродуктов и различных технологических пульп является очень сложным процессом для точного математического описания. Это связано с тем, что движение жидкостей через слой пористого материала зависит от большого количества факторов, характеризующих свойства материалов и веществ, участвующих в процессе. Тем не менее зависимости, основанные на уравнении Козени – Кармана [1], с достаточной точностью описывают процесс, пригодный для промышленного расчета фильтров.

В данной работе рассматриваются модели фильтрования суспензии при постоянном перепаде давления с образованием несжимаемого осадка. На практике такой процесс фильтрования является самым распространенным.

Основное уравнение фильтрования основано на законе Дарси [2] и показывает, как изменяется расход фильтрата в зависимости от разности давлений до и после фильтровальной перегородки, а также от сопротивления этой перегородки и образовавшегося слоя осадка:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Delta p A}{\mu \alpha_{уд} \left[\frac{C_w \rho}{(1 - C_w m)} \right] \frac{V}{A} + \mu R_n}, \quad (1)$$

где V – объем фильтрата, м^3 ; t – время, с; Δp – перепад давления до и после фильтровальной перегородки, Па; A – площадь фильтровальной перегородки, м^2 ; μ – динамическая вязкость жидкой фазы суспензии, Па·с; $\alpha_{уд}$ – удельное сопротивление осадка, $\text{м} \cdot \text{кг}^{-1}$; C_w – массовая доля твердого в суспензии; ρ – плотность жидкой фазы суспензии, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; m – влажность осадка после фильтрования; R_n – сопротивление фильтровальной перегородки, м^{-1} .

После интегрирования уравнения (1) при постоянном перепаде давления (т.е. при $\Delta p = \text{const}$) основное уравнение фильтрования примет следующий вид:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu \alpha_{уд}}{2A^2 \Delta p} \left[\frac{C_w \rho}{(1 - C_w m)} \right] V + \frac{\mu R_n}{A \Delta p} = aV + b, \quad (2)$$

где a и b – константы, если используется один и тот же фильтр с постоянным перепадом давления при фильтровании постоянной по своему массовому составу суспензии.

Для последующего моделирования для определения количества фильтрата в зависимости от времени удобнее будет использовать следующее уравнение:

$$V = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4at}}{2a}. \quad (3)$$

Высота образующегося осадка на фильтровальной перегородке прямо пропорциональна прошедшему через эту перегородку фильтрату [3], поэтому для определения высоты осадка в зависимости от времени удобно использовать следующую формулу:

$$L = \frac{VC_w [\rho_s (m-1) + \rho]}{A \rho_s (1 - mC_w)}, \quad (4)$$

где ρ_s – плотность твердой фазы суспензии, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$.

Влажность осадка после фильтрования можно оценить, зная среднее значение его пористости, а также плотности жидкой и твердой фазы суспензии:

$$m = 1 + \frac{\rho \varepsilon}{\rho_s (1 - \varepsilon)}, \quad (5)$$

где ε – среднее значение пористости осадка.

Перепад давления при фильтровании неизбежно влияет на свойства образующегося осадка, меняя его среднее значение сопротивления и среднее значение пористости. Если это влияние велико, то осадок называют сжимаемым, если влиянием можно пренебречь, то осадок – несжимаемый. Оценить влияние давления на свойства осадка можно по следующим зависимостям:

$$\alpha_{уд} = \alpha_0 (\Delta p)^n, \quad (6)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (\Delta p)^{-\lambda}, \quad (7)$$

где α_0 , n , ε_0 и λ – константы для данной суспензии, которые определяются при проведении эксперимента.

Описание экспериментальной установки и проведение экспериментов

Для проведения экспериментов была использована суспензия, представляющая собой смесь частиц железного концентрата Fe_3O_4 и воды. Ниже приведены исходные характеристики суспензии:

1) плотность твердой фазы $\rho_s = 3947,25 \text{ кг/м}^3$;

2) плотность жидкой фазы (воды) $\rho = 987,45 \text{ кг/м}^3$;

3) вязкость жидкой фазы (при $18,2^\circ \text{C}$) $\mu = 0,0286 \text{ Па} \cdot \text{с}$;

4) массовая доля твердого в суспензии $C_w = 0,38$.

Для проведения экспериментов был использован лабораторный периодический нутч-фильтр с площадью фильтровальной перегородки $A = 0,0022 \text{ м}^2$, установленный в Лапееврантском техническом университете (г. Лапеевранта, Финляндия). Схематическое изображение фильтра приведено на рис. 1.

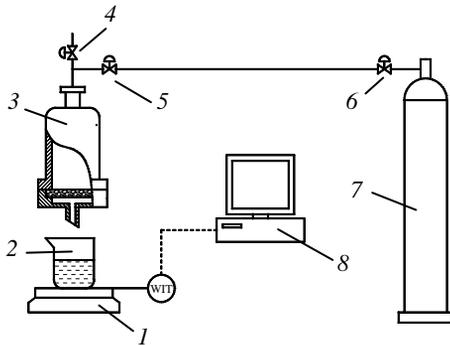


Рис. 1. Схематическое изображение лабораторного фильтра: 1 – весы; 2 – емкость для сбора фильтрата; 3 – фильтр; 4 – входной патрубок для суспензии; 5 – клапан для подачи давления; 6 – клапан, регулирующий подачу давления; 7 – баллон с азотом для создания давления; 8 – компьютер для сбора данных

Эксперименты выполнялись при 3 различных перепадах давления Δp (2; 4 и 6 бар), при этом в реальном времени фиксировался вес получаемого фильтрата. На основании проведенных экспериментов были установлены следующие харак-

теристики осадка (в зависимости от перепада давления) и фильтровальной перегородки:

$$\alpha_{\text{уд}} = 1,791 \cdot 10^{10} (\Delta p)^{0,154} \text{ м/кг},$$

$$\varepsilon = 0,628 (\Delta p)^{-0,497}, \quad R_{\text{п}} = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-1}.$$

Разработка математической модели фильтрования в Matlab (Simulink)

На основании формул (3)–(5), а также зависимостей удельного сопротивления и средней пористости осадка от перепада давления в программе Simulink была реализована математическая модель процесса фильтрования при постоянном перепаде давления, учитывающая сжимаемость образующегося осадка. Модель представлена на рис. 2.

На рис. 3 показаны изменения расходов фильтрата в зависимости от времени для различных перепадов давлений, полученные экспериментальным путем, а также с помощью моделирования процесса.

Как видно из графиков, приведенных на рис. 3, модель достаточно точно описывает изменение объема фильтрата в зависимости от времени. Видны небольшие отклонения экспериментальных данных от данных моделирования в некоторые моменты времени фильтрования. Это связано прежде всего с непостоянством значения давления в течение процесса фильтрования.

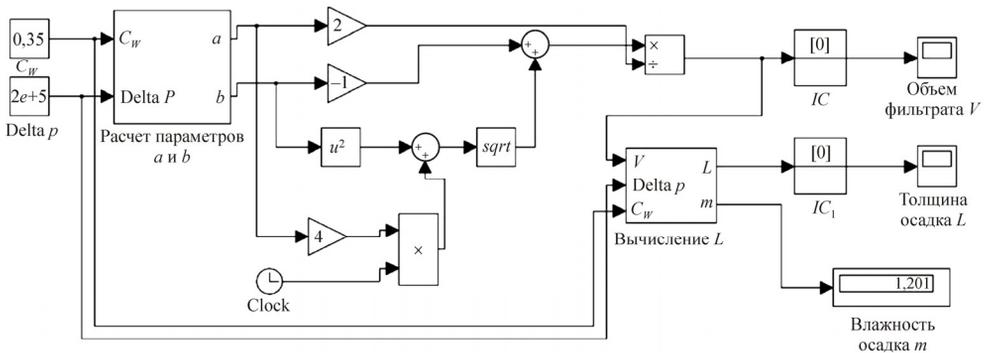


Рис. 2. Модель процесса фильтрования, построенная в Simulink ($\Delta p = 2 \text{ бар}$)

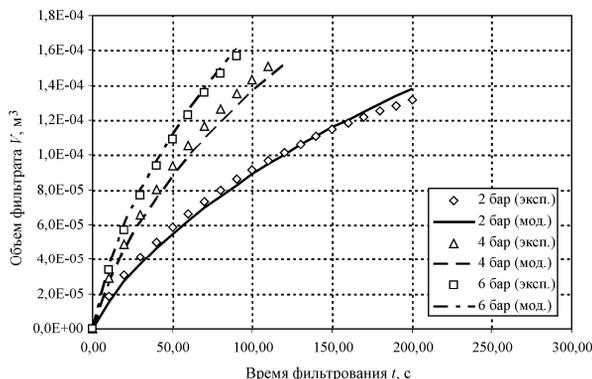


Рис. 3. Экспериментальные данные с лабораторного фильтра, а также данные моделирования процесса в Simulink

Список литературы

1. Фильтрация технологических пульп / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев, О.Н. Тихонов, Ю. Куукка, Э. Яскеляйнен. – М.: Руда и металлы, 2003. – 320 с.
2. Голубятников В.А., Шуvalo В.В. Автоматизация производственных процессов в химической промышленности. – М.: Химия, 1985. – 350 с.
3. Rushton A., Ward A.S., Holdich R.G., Solid-liquid Filtration and Separation Technology. – 2nd revised ed. – Wiley-VCH, 2000.
4. Svarovsky L. Solid-liquid separation. – 4th ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. – 568 p.

References

1. Beloglazov I.N., Golubev V.O., Tikhonov O.N., Kuukka Iu., Iaskeliainen E. Fil'trovaniye tekhnologicheskikh pul'p [Filtration of technological pulps]. Moscow: Ruda i metally, 2003. 320 p.
2. Golubiatnikov V.A., Shuvalo V.V. Avtomatizatsiia proizvodstvennykh protsessov v khimicheskoi promyshlennosti [Automation of production processes in chemical industry]. Moscow: Khimiia, 1985. 350 p.
3. Rushton A., Ward A.S., Holdich R.G. Solid-liquid Filtration and Separation Technology. 2nd revised ed. Wiley-VCH, 2000
4. Svarovsky L. Solid-liquid separation. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2000. 568 p.

Об авторах

Белоглазов Илья Ильич (Санкт-Петербург, Россия) – ассистент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в, 21-я линия, д. 2; e-mail: beloglazov@spmi.ru).

Фирсов Александр Юрьевич (Санкт-Петербург, Россия) – доцент кафедры автоматизации технологических процессов и производств Национального минерально-сырьевого университета «Горный» (199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в, 21-я линия, д. 2; e-mail: atpp@spmi.ru).

Сафонов Дмитрий Николаевич (Лаппеенранта, Финляндия) – кандидат технических наук, ассистент, ский технический университет (P.O.Box 20 FI-53851, Lappeenranta, Finland; e-mail: beloglazov@spmi.ru).

About the authors

Ilya I. Beloglazov (Saint Petersburg, Russian Federation) – Assistant, Department of Technological Process Automation, National Mineral Resources University (University of Mines) (199106, Saint Petersburg, 21st line, Vasilevsky Island, 2; e-mail: beloglazov@spmi.ru).

Aleksandr Iu. Firsov (Saint Petersburg, Russia) – Associate Professor, Department of Technological Process Automation, National Mineral Resources University (University of Mines) (199106, Saint Petersburg, 21st line, Vasilevsky Island, 2; e-mail: atpp@spmi.ru).

Dmitrii N. Safonov (Lappeenranta, Finland) – Ph.D. in Technical Sciences, Assistant, Lappeenranta University of Technology (P.O.Box 20 FI-53851, Lappeenranta, Finland; e-mail: beloglazov@spmi.ru).

Получено 6.11.2013