

УДК 622.794.254

С.В. Тынына<sup>1</sup>, А.Е. Шевченко<sup>2</sup>, И.И. Чоботько<sup>3</sup>

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЙ СУСПЕНЗИИ ПРИ ПУЛЬСИРУЮЩЕМ ДАВЛЕНИИ

<sup>1</sup> Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, 49005, г. Днепр, ул. Симферопольская, 2-а.

<sup>2</sup> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Gustav-Zeuner Str. 1A, 09599 Freiberg, Germany.

<sup>3</sup> Государственное ВУЗ «НГУ», 49005 г. Днепр, пр. Дмитрия Яворницкого, 19

*Для повышения эффективности обезвоживания тонкодисперсных суспензий в современных фильтровальных машинах целесообразно применять пульсирующее давление.*

*В статье освещены результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса фильтрации тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении, рассмотренного на примере морских глубоководных органоминеральных осадков Черного моря.*

*Установлены факторы, влияющие на процесс фильтрации суспензии при пульсирующем давлении, и их интервалы варьирования; выполнена постановка эксперимента. Построена регрессионно-статистическая математическая модель процесса фильтрации органоминеральных осадков при пульсирующем давлении, а также эмпирическая математическая модель процесса фильтрации при статическом давлении. Выполнен статистический анализ адекватности математических моделей.*

*Полученные результаты могут быть использованы при разработке фильтровальных машин и технологических процессов при пульсирующем и статическом давлении.*

**Ключевые слова:** тонкодисперсная суспензия, фильтрация, пульсирующее давление, многофакторный эксперимент, глубоководные органоминеральные осадки.

### Постановка проблемы

Большинство фильтровальных машин, наиболее широко распространенных в промышленности для обезвоживания тонкодисперсных суспензий с крупностью частиц менее 0,2 мм, работает при статическом давлении [1]. Из-за высокого удельного сопротивления тонкодисперсной суспензии процесс фильтрации протекает медленно, а повышение давления не всегда является

рациональным, поскольку это приводит к значительному увеличению энергоёмкости процесса и металлоёмкости оборудования. Поэтому на практике прибегают к методам интенсификации процесса фильтрования за счет термического, химического, электрического, физико-механического и др. воздействия на суспензию [2].

Одним из наиболее перспективных методов повышения производительности фильтровальных машин является использование пульсирующего давления. Проведенные исследования [3, 4] показывают эффективность данного метода в сравнении с фильтрованием суспензии при статическом давлении.

В настоящее время фильтровальные машины, работающие при пульсирующем давлении, не нашли широкого применения, а создание новых конструкций таких машин является сложной технической задачей, которая требует проведения теоретических и экспериментальных исследований.

### 1. Цель исследования

Современные теоретические исследования процесса фильтрования суспензии основаны на уравнениях движения жидкости в пористой среде и уравнении неразрывности (уравнения Навье-Стокса). Для несжимаемой жидкости эти уравнения имеют вид [5, 6]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \mu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$
$$\vec{v} \cdot \nabla = 0,$$

где  $\nabla$  – оператор Набла,  $\Delta$  – векторный оператор Лапласа,  $t$  – время,  $\mu$  – вязкость жидкости,  $\rho$  – плотность,  $p$  – давление,  $\vec{v}$  – векторное поле скоростей,  $\vec{f}$  – векторное поле массовых сил.

Решение вышеприведенных уравнений затруднительно в связи с отсутствием информации по выбору начальных и граничных условий из-за разнообразия свойств суспензий. Поэтому на сегодняшний день актуальным остается проведение экспериментальных исследований.

Наиболее эффективным методом проведения экспериментальных исследований являются лабораторные исследования с использованием конструкции оборудования, допускающей активное влияние на его работу (активный эксперимент). Такие исследования в сравнении с экспериментом в промышленном масштабе требуют минимальных затрат времени и средств.

Создание пульсирующего давления усложняет экспериментальные исследования процесса фильтрования суспензии, поскольку увеличивается число факторов, влияющих на этот процесс. Для сокращения объема работ и получения статистически адекватных математических моделей, описывающих процесс фильтрования суспензии при пульсирующем давлении, требуется

научно обоснованный подход с применением методов планирования и постановки экспериментальных исследований и статистических методов обработки результатов эксперимента.

**Целью** настоящей работы является установление закономерностей и степени влияния основных параметров процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии глубоководных органо-минеральных осадков (ГВОМО) при пульсирующем давлении на характер и эффективность его протекания, а также построение регрессионно-статистической математической и интерпретационной моделей данного процесса, которые могут быть использованы при обосновании параметров вибрационной фильтровальной машины и технологических процессов с ее применением.

## 2. Методика лабораторных исследований

### Выбор факторов и интервалов варьирования

Применяя математическую теорию активного эксперимента [7], модель процесса фильтрования при пульсирующем давлении структурно можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 1.



$p_{st}$  – статическая составляющая давления (Па);  $p_d$  – динамическая составляющая давления (Па);  $\omega$  – круговая частота (рад/с);  $t$  – время (с);  $\mu$  – вязкость жидкости (Па·с);  $\rho$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>);  $\varepsilon$  – пористость;  $S$  – площадь фильтровальной поверхности (м<sup>2</sup>);  $L$  – начальная высота слоя суспензии (м);  $d_p$  – эквивалентный диаметр твердых частиц (м);  $\Phi$  – фактор формы частиц;  $\rho_s$  – плотность частиц (кг/м<sup>3</sup>);  $W_0$  – влажность суспензии;  $W_k$  – влажность осадка;  $V$  – объем фильтрата (м<sup>3</sup>);  $l$  – высота слоя осадка (м)

**Рис. 1.** Структурная схема входных и выходных параметров процесса фильтрования суспензии при пульсирующем давлении

Как видно из структурной схемы (рис. 1), отклики (выходные параметры)  $V$ ,  $W_k$  и  $l$  зависят от большого числа величин, т.е.

$$y_i = f(p_{st}, p_d, \omega, t, \mu, \rho, \varepsilon, S, L, d_p, \Phi, \rho_s, W_0).$$

Исследование влияния всех вышеприведенных факторов на процесс фильтрования суспензии при пульсирующем давлении является сложной задачей. Поэтому из общего числа факторов необходимо отобрать те, изучение влияния которых даст наиболее информативную картину.

Варьируемые в процессе исследований параметры (факторы) должны соответствовать следующим требованиям [8]:

1. Факторы должны быть управляемыми, т.е. установленное значение фактора должно поддерживаться постоянным на протяжении всего опыта.
2. Точность замера фактора должна быть как можно выше.
3. Факторы должны быть однозначными и функционально независимыми друг от друга.
4. Факторы должны быть совместимы, т.е. не вызывать аварийных ситуаций в работе исследуемого устройства.

Выше перечисленным требованиям удовлетворяют только 5 из 13 факторов:  $p_{st}$ ,  $p_d$ ,  $\omega$ ,  $S$ ,  $t$ .

Так как объем фильтрата  $V$  зависит от влажности суспензии  $W_0$ , влажности осадка  $W_k$ , площади фильтрования  $S$  и начальной высоты слоя суспензии  $L$ , число выходных параметров (откликов) можно уменьшить до одного.

Площадь фильтрования  $S$  для фильтров с плоскими фильтровальными перегородками остается постоянной в течение процесса, следовательно, в качестве отклика целесообразно рассматривать соотношение  $V/S$  ( $\text{м}^3/\text{м}^2$ ). Данное соотношение характеризует объем фильтрата, образованный единицы площади фильтровальной поверхности.

Вместо варьируемого параметра  $p_{st}$  целесообразно использовать безразмерное соотношение  $p_{st}/p_a$ , где  $p_a$  – атмосферное давление. Использование этого соотношения избавляет от необходимости дополнительных замеров, позволяя ограничиться только измерением статического давления.

В качестве параметра, характеризующего динамическую составляющую давления  $p_d$ , использовано соотношение  $p_d/p_{st} < 1$ .

Установлено, что в процессе фильтрования тонкодисперсных суспензий при статическом давлении в течение некоторого начального промежутка времени от 0 до  $t_0$  наблюдается увеличение скорости фильтрования [9], которое связано с выравниванием и распределением давления в пористой среде. Исходя из этого, время фильтрования суспензии рационально представить в виде безразмерного соотношения  $t/t_0$ , где  $t_0$  – время, протекающее от начала процесса фильтрования до его условной стабилизации.

Таким образом, получаем систему из четырех параметров:

$$\frac{V}{S} = f\left(\frac{p_{st}}{p_a}, \frac{p_d}{p_{st}}, \frac{t}{t_0}, \omega\right).$$

Блок-схема процесса фильтрации суспензии при пульсирующем давлении представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Структурная схема параметров, варьируемых при эксперименте

Область определения факторов ограничена параметрами лабораторной фильтровальной установки, пределами измерений имеющейся измерительной аппаратуры, условиями проведения опытов и др. условиями. Поэтому важным этапом при подготовке активного эксперимента является выбор интервалов варьирования [7]. Установленные значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Значения уровней и интервалов варьирования факторов**

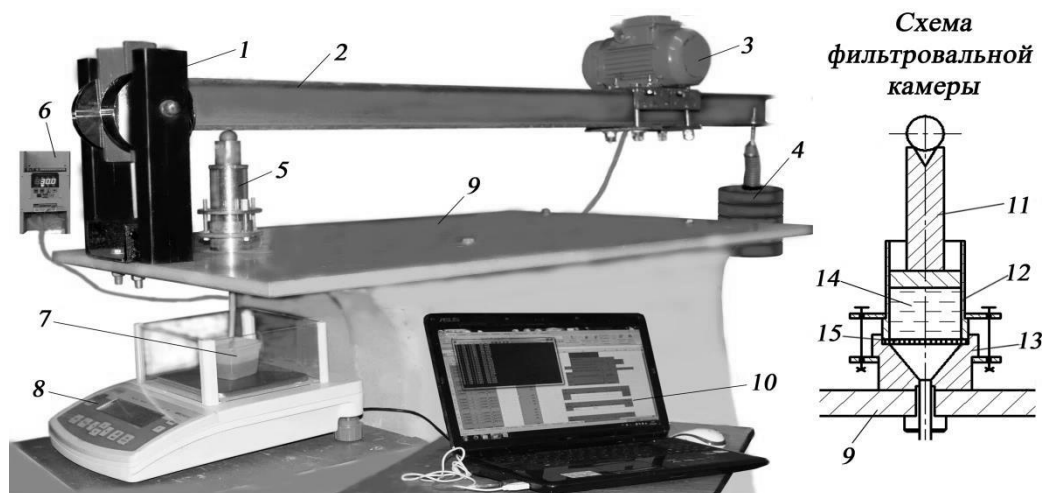
Обозначение факторов	Кодированное обозначение	Интервалы варьирования $c_i$	Уровни варьирования факторов		
			«-1»	«0»	«+1»
$p_{st}/p_a$ , Па/Па	$X_1$	15	10	25	40
$\omega$ , рад/с	$X_2$	125,7	125,6	251,3	377,0
$p_d/p_{st}$ , Па/Па	$X_3$	0,3	0,3	0,6	0,9
$t/t_0$ , с/с	$X_4$	4,5	1	5,5	10

“0” – нулевой уровень (начало координат); “+1” – верхний уровень (максимальное значение фактора); “-1” – нижний уровень (минимальное значение фактора).

**Лабораторная фильтровальная установка**

Экспериментальные исследования процесса фильтрации тонкодисперсной суспензии проводились на разработанной лабораторной фильтровальной установке, представленной на рисунке 3. Основные технические характери-

стики лабораторной фильтровальной установки приведены в таблице 2. В качестве суспензии выступали образцы морских глубоководных органоминеральных осадков Черного моря.



1 – опора; 2 – коромысло; 3 – вибратор; 4 – груза; 5 – фильтровальная камера; 6 – частотный преобразователь; 7 – сосуд для фильтрата; 8 – лабораторные электронные весы; 9 – основание; 10 – компьютер; 11 – шток с поршнем; 12 – цилиндрическая стенка; 13 – стакан; 14 – суспензия; 15 – фильтровальная перегородка

**Рис. 3.** Лабораторная установка для исследования процесса фильтрации суспензии при пульсирующем давлении

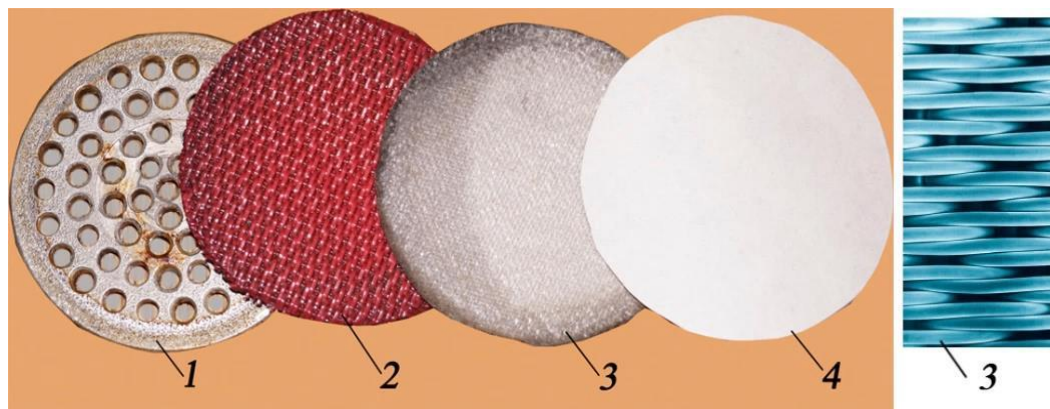
Таблица 2

**Технические характеристики лабораторной фильтровальной установки**

Внутренний диаметр фильтровального цилиндра, м	0,036
Диапазон рабочих давлений, МПа	0,5-9,0
Максимальный ход поршня, м	0,04
Высота засыпки суспензии, м	0,02
Диапазон частот возмущающей силы вибровозбудителя, Гц	0-70
Площадь фильтрации, м <sup>2</sup>	0,001

При проведении экспериментальных исследований использовалась плоская фильтровальная перегородка (рис. 4), состоящая из жесткого перфорированного основания 1, пластиковой сетки 2 с размером ячеек около 0,74 мм и толщиной 1,0 мм, на которой закреплялась фильтровальная ткань 3 типа 05-1010-SK 006 STN с размером ячеек 0,006 мм. Для исключения забивания пор фильтровальной ткани использовалась фильтровальная бумага 4.

Конструкция лабораторной фильтровальной установки позволяет влиять на процесс фильтрования, протекающий в ней, путем изменения геометрических и технологических характеристик: высоты слоя фильтруемой суспензии; величины статической и динамической составляющих давления; площади фильтрования; типа фильтровальной перегородки; частоты пульсации давления.



1 – стальное перфорированное основание; 2 – пластиковая сетка; 3 – фильтровальная ткань; 4 – фильтровальная бумага

Рис. 4. Фильтровальная перегородка

#### **Порядок проведения опытов**

Значения статического давления  $p_{st}$  определялись расчетным методом. Так как давление  $p_{st}$  зависит от массы грузов  $m_g$ , подвешиваемых на конце коромысла 2 (рис. 3), была выполнена тарировка, в соответствии с которой:

$$p_{st} = 0,1 \cdot m_g + 0,41 \text{ (МПа)}.$$

Относительная ошибка для параметра  $p_{st}$  составила порядка 3%.

Значение частоты вынуждающей силы устанавливалось при помощи частотного преобразователя тока с точностью до 0,1 Гц и поддерживалось постоянным в ходе опытов.

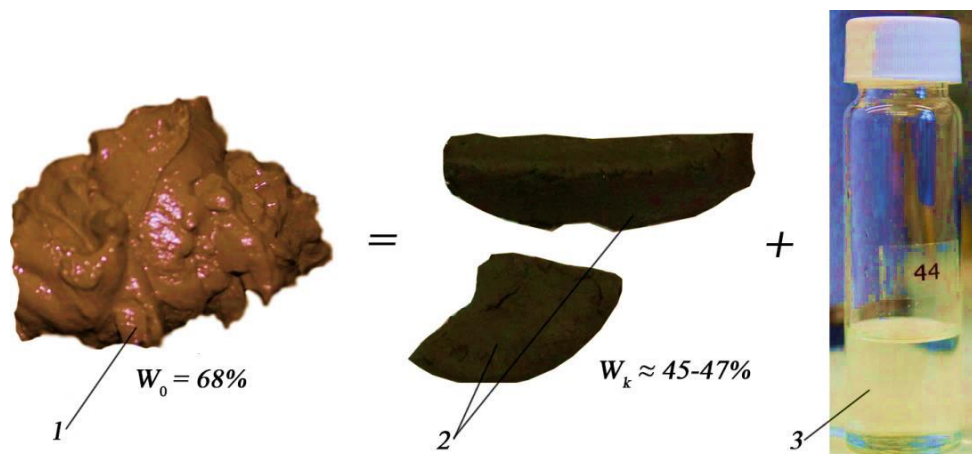
Значение параметра  $p_d/p_{st}$  определялось расчетным путем с учетом технических характеристик вибратора. Максимальная погрешность для параметра  $p_d/p_{st}$  составила 7%.

В ходе опытов снимались показания массы фильтрата  $m_f$ , получаемого за время  $t$ , значения которых записывались на компьютер, подключенный к лабораторным электронным весам. После чего выполнялся пересчет массы фильтрата в объем суспензии ( $V$ ) по формуле:

$$V = \frac{m_f}{\rho},$$

где  $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$  (плотность морской воды).

В конце каждого опыта получали осадок (обезвоженный материал), средняя влажность которого составила порядка 45-47% и чистый фильтрат (рис. 5). Исследование содержания твердых частиц в фильтрате, полученном в процессе фильтрования, не выявило их наличия.



1 – исходная суспензия (ГВОМО); 2 – обезвоженный материал; 3 – фильтрат

Рис. 5. Результат фильтрования образцов ГВОМО

### Исследования свойств суспензии

Основные физико-механические свойства исследуемых образцов морских ГВОМО представлены в работе [10]. Средняя начальная влажность суспензии составила  $W_0 = 68\%$ , средняя плотность твердых частиц равна  $\rho_s = 2387 \text{ кг/м}^3$ , средняя плотность суспензии  $1250 \text{ кг/м}^3$ . Согласно результатам исследований гранулометрического состава ГВОМО более 80 – 85% образцов составляют глинистые частицы размером менее 10 мкм, доля частиц крупностью менее 5 мкм составляет 60 – 65%, частиц крупностью менее 1,1 мкм – около 10%.

### 3. План и постановка эксперимента

В эксперимент входят четыре фактора, влияние которых должно быть исследовано в результате проведения опытов. В качестве плана для проведения эксперимента принят некомпозиционный план (план Бокса) [7, 11], так как он требует проведения наименьшего количества опытов в сравнении с другими планами второго порядка. Матрица некомпозиционного плана представлена в таблице 3. Используемый план эксперимента позволяет получить полиномиальную квадратичную математическую модель, описывающую процесс фильтрования суспензии при пульсирующем давлении.

Для определения количества повторных опытов  $n$  (при одних и тех же условиях) использовалась зависимость, приведенная в работе [12]:



$$n = \frac{v^2 t_{\alpha,m}^2}{\alpha^2}, \quad (1)$$

где  $v$  – выборочный коэффициент вариации;  $\alpha$  – максимальная относительная ошибка;  $t_{\alpha,m}$  – статистический коэффициент для числа степеней свободы  $m = n - 1$  и доверительной вероятности  $P = 1 - \alpha/2$  (определяется по таблице).

Априорно задается коэффициент вариации  $v = 0,1$  и параметр  $\alpha = 0,1$ . При доверительной вероятности  $P = 1 - \alpha/2 = 0,95$  квантиль  $t_{\alpha,m} = 1,64$  [12]. Согласно зависимости (1) требуемое количество измерений равно  $n \approx 3$ . Количество повторных опытов может быть увеличено в случае превышения коэффициентом вариации измеряемой величины значения 0,1.

Для определения количества повторных опытов выполнены предварительные экспериментальные исследования. Опыты были проведены с использованием образцов ГВОМО при следующих параметрах процесса фильтрования:  $p_{st} = 2,0$  МПа;  $p_d/p_{st} = 0,6$ ;  $\omega = 40$  Гц;  $t = 300$  с. Количество параллельных опытов составило 16. Измеряемая величина: объем фильтрата  $V$ .

Таблица 3

Матрица некомпозиционного плана для четырех факторов

№ опыта	План эксперимента					№ опыта	План эксперимента				
	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$		$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$
1	1	1	1	0	0	15	1	0	1	-1	0
2	1	1	-1	0	0	16	1	0	-1	1	0
3	1	-1	1	0	0	17	1	0	-1	-1	0
4	1	-1	-1	0	0	18	1	0	0	0	0
5	1	0	0	1	1	19	1	1	0	1	0
6	1	0	0	1	-1	20	1	1	0	-1	0
7	1	0	0	-1	1	21	1	-1	0	1	0
8	1	0	0	-1	-1	22	1	-1	0	-1	0
9	1	0	0	0	0	23	1	0	1	0	1
10	1	1	0	0	1	24	1	0	1	0	-1
11	1	1	0	0	-1	25	1	0	-1	0	1
12	1	-1	0	0	1	26	1	0	-1	0	-1
13	1	-1	0	0	-1	27	1	0	0	0	0
14	1	0	1	1	0	–	–	–	–	–	–

После статистического анализа результатов измерений, установлено, что величина  $V$  распределена по нормальному закону распределения. Коэффициент вариации для параметра  $V$  составил 0,02 (менее 10%), поэтому окончательно количество параллельных опытов принято равным 3.

#### 4. Результаты исследований

##### *Математическая модель процесса фильтрации ГВОМО при пульсирующем давлении*

На основании априорной информации известно, что исследуемый процесс фильтрации суспензии описывается нелинейными зависимостями. Поэтому для описания этого процесса принята полиномиальная модель второго порядка, имеющая вид:

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq k} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2,$$

где  $y$  – значение критерия;  $i$  – номер опыта;  $k$  – число факторов;  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты регрессии;  $j$  – число значимых коэффициентов.

В результате проведения опытов получен массив данных параметров  $V/S$ , который был использован для построения математической модели процесса. Эта модель может быть применена при прогнозировании значений  $Y = V/S$  (м) – удельного объема фильтрата при любых значениях факторов, находящихся между верхними и нижними уровнями варьирования:

$$\begin{aligned} Y = & 3,55 \cdot 10^{-3} + 0,62 \cdot 10^{-3} X_1 + 0,23 \cdot 10^{-3} X_2 + 2,02 \cdot 10^{-3} X_4 - \\ & - 0,15 \cdot 10^{-3} X_1 X_3 + 0,42 \cdot 10^{-3} X_1 X_4 + 0,21 \cdot 10^{-3} X_2 X_4 - \\ & - 0,12 \cdot 10^{-3} X_1^2 - 0,13 \cdot 10^{-3} X_2^2 - 0,06 \cdot 10^{-3} X_3^2 - 0,12 \cdot 10^{-3} X_4^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя зависимость

$$X_i = \frac{x_i - x_{0i}}{c_i},$$

перейдем от кодированных переменных ( $X_i$ ) к физическим ( $x_i$ ), где  $x_{0i}$  – значение фактора на «0»-уровне. Отсюда получим интерполяционную модель в физических переменных:

$$\begin{aligned} Y = & 3,55 \cdot 10^{-3} + 4,1 \cdot 10^{-5} (x_1 - 25) + 1,8 \cdot 10^{-6} (x_2 - 251,3) + 4,5 \cdot 10^{-4} (x_4 - 5,5) - \\ & - 3,4 \cdot 10^{-5} (x_1 - 25)(x_3 - 0,6) + 6,22 \cdot 10^{-6} (x_1 - 25)(x_4 - 5,5) + \\ & + 3,77 \cdot 10^{-7} (x_2 - 251,3)(x_4 - 5,5) - 5,24 \cdot 10^{-7} (x_1 - 25)^2 - 7,91 \cdot 10^{-9} (x_2 - 251,3)^2 - \\ & - 6,33 \cdot 10^{-4} (x_3 - 0,6)^2 - 5,83 \cdot 10^{-6} (x_4 - 5,5)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Относительная ошибка аппроксимации экспериментальных данных математической моделью (3) составила 10,8%, коэффициент корреляции модели равен  $R^2 = 0,986$ . Это свидетельствует о хорошем подборе модели к исходным данным.

**Математическая модель процесса фильтрации ГВОМО при статическом давлении**

Для оценки эффективности использования пульсирующего давления были проведены экспериментальные исследования процесса фильтрации ГВОМО при статическом давлении (без пульсации).

В качестве исходной суспензии взяты пробы ГВОМО, которые использовались при исследовании процесса, протекающего при пульсирующем давлении. Варьируемыми параметрами выступали время фильтрации  $t$ , изменяемое в диапазоне от 60 до 1800 с, и статическое давление  $p_{st}$ , варьируемое в диапазоне от 1,0 до 4,0 МПа. Измеряемый параметр: объем фильтрата  $V$ .

Для построения математической модели использовалась зависимость Дарси [9], имеющая вид:

$$V / S = \sqrt{t / r'}, \quad (4)$$

где  $r' = f(p_{st}/p_a)$  – приведенное удельное сопротивление слоя суспензии (с/м<sup>2</sup>).

На основании экспериментальных данных, полученных в ходе исследований, получена эмпирическая зависимость:

$$r'(p_{st} / p_a) = a_r \cdot (p_{st} / p_a)^{-0,58}, \quad (5)$$

где  $a_r = 3,109 \cdot 10^8$  с/м<sup>2</sup>;  $p_a = 0,1$  МПа.

Подставив зависимость (5) в (4), после соответствующих преобразований получим математическую модель, описывающую процесс фильтрации ГВОМО при статическом давлении:

$$V / S = \sqrt{\frac{I}{a_r} \cdot t \cdot (p_{st} / p_a)^{0,58}}. \quad (6)$$

После выполнения статистического анализа отклонений расчетных (по формуле (6)) и экспериментальных значений параметра  $V/S$  установлено, что для доверительной вероятности 0,9 максимальная погрешность расчетных и экспериментальных данных составила 19%. Среднее значение отклонений расчетных параметров  $V/S$  по (6) и экспериментальных значений равно 3%.

**5. Анализ результатов**

Для оценки эффективности использования пульсирующего давления в сравнении со статическим построены зависимости скорости фильтрации ( $dV/Sdt$ ) от времени и давления, представленные на рисунке 6.

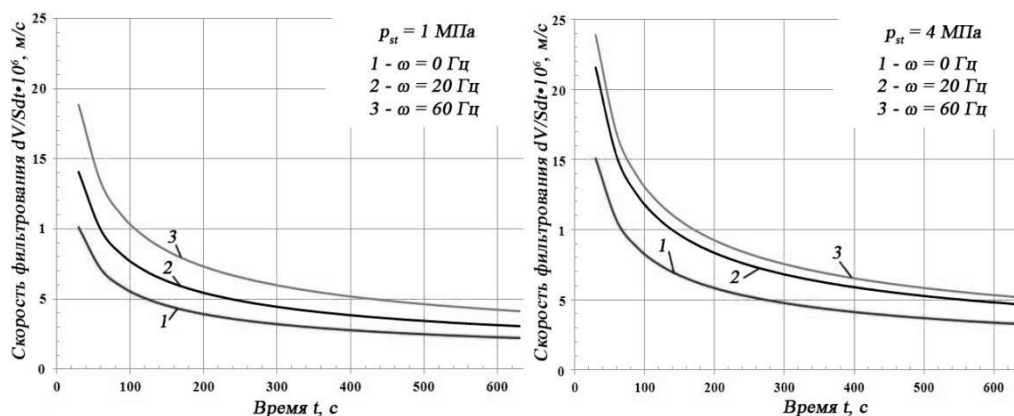


Рис. 6. Зависимости скорости фильтрования ГВОМО от времени

Как видно из графиков (рис. 6), скорость фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении значительно выше, чем скорость фильтрования при соответствующем статическом давлении. При давлении  $p_{st} = 1 \text{ МПа}$  и частоте пульсации 20 Гц повышение скорости фильтрования составило 39% относительно процесса при статическом давлении, а для частоты пульсации 60 Гц – 87,0%. Для давления  $p_{st} = 4 \text{ МПа}$  повышение скорости фильтрования составило при частоте пульсации давления 20 Гц – 42%, при частоте 60 Гц – 58%.

Выполненный анализ полученных математических моделей также позволил установить, что наибольшее влияние на процесс фильтрования тонкодисперсной суспензии (на примере ГВОМО) оказывает время фильтрования. Вторым по значимости фактором является статическая составляющая давления. Значительное влияние на процесс фильтрования суспензии при пульсирующем давлении оказывает также частота пульсации, варьируемая в установленном диапазоне.

Изменение динамической составляющей давления в исследуемом диапазоне практически не влияет на процесс фильтрования ГВОМО при пульсирующем давлении.

### Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении, в роли которой выступали образцы органоминеральных осадков Черного моря, и анализа полученной математической модели процесса, установлено, что определяющими факторами данного процесса являются: статическая составляющая давления фильтрования, отношение динамической составляющей давления к статической, время фильтрования и частота пульсации давления.

Наибольшее влияние на процесс фильтрования органоминеральных осадков при пульсирующем давлении оказывает время фильтрования.

Наименьшее влияние оказывает отношение динамической составляющей давления к статической, характеризующее амплитуду пульсации давления.

При этом изменение этого параметра в установленном интервале варьирования практически не оказывает никакого влияния на исследуемый процесс.

Также установлено, что эффективность процесса фильтрования при пульсирующем давлении в сравнении с процессом без пульсации (при одних и тех же параметрах) составила для частоты пульсации 20 Гц порядка 40%, для частоты пульсации 60 Гц – более 58%.

Таким образом, можно сделать вывод, что определяющими факторами для процесса фильтрования тонкодисперсной суспензии при пульсирующем давлении являются время, давление и частота пульсации давления.

1. *Tarleton E.S.* Solid/Liquid Separation - Equipment Selection and Process Design / E.S. Tarleton, R.J. Wakeman. – Elsevier. – 2007. – 448 p.
2. *Белоглазов И.Н.* Основы расчета фильтрационных процессов / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев. – М.: Издательский дом «Руда и Металлы», Санкт-Петербург, 2002. – 210 с.
3. *Франчук В.П.* Использование вибрационного воздействия для повышения эффективности фильтрования глубоководных органико-минеральных осадков Черного моря / В.П. Франчук, А.В. Анциферов, А.Е. Шевченко // Вибрации в технике та технологиях. – №3 (75). – 2014 г. – С. 136-144.
4. *Варсанофьев В.Д.* Вибрационная техника в химической промышленности / В.Д. Фарсанофьев, Э.Э. Кольман-Иванов. – М.: Химия. – 1985. – 240 с., с ил.
5. *Седов Л.И.* Механика сплошной среды / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1970. – Т. 1. – 492 с.
6. Электронный ресурс: <https://de.wikipedia.org/wiki/Navier-Stokes-Gleichungen> (15.03.2015).
7. *Спиридонов А.А.* Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов // М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
8. *Любченко Е.А.* Планирование и организация эксперимента: учебное пособие. Часть 1 / Е.А. Любченко, О.А. Чуднова // Владивосток: Изд-во ТГЭУ, 2010. – 156 с.
9. *Жужиков В.А.* Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий / В.А. Жужиков. – М.: Химия. – 1980. – 398 с.
10. *Franchuk V.P.* Deep-water organic-mineral sediments of the Black Sea as the object of mining and dewatering / V.P. Franchuk, T.V. Shepel, O.E. Shevchenko // National mining University journal. – 2014. – №44. – pp. 86-91.
11. *Vox G.E.P.* Some new three level designs for the study of quantitative variables / G.E.P. Vox, D.W. Behnken // Technometrics. – 1960. – vol. 2, Nr. 4. – pp. 455-475.
12. *Кузнецов Н.Н.* К вопросу об определении количества опытов, надежности и точности результатов при изучении физико-механических свойств горных пород / Н.Н. Кузнецов // Вестник МГТУ, том 18. – № 2, 2015 г. – С. 183-191.

*С.В. Тинина, О.С. Шевченко, І.І. Чоботько*

## **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРУВАННЯ ТОНКОДИСПЕРСНОЇ СУСПЕНЗІЇ ПРИ ПУЛЬСУЮЧОМУ ТИСКУ**

Для підвищення ефективності зневоднення дрібнодисперсних суспензій у сучасних фільтрувальних машинах доцільно використовувати пульсуючий тиск.

У статті освітлено результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу фільтрування дрібнодисперсної суспензії при пульсуючому тиску, розглянутого на прикладі морських глибоководних органо-мінеральних відкладень Чорного моря.

Встановлено фактори, що впливають на процес фільтрування суспензії при пульсуючому тиску, і їх інтервали варіювання; виконана постановка експерименту. Побудовано регресійно-статистичну математичну модель процесу фільтрування органо-мінеральних відкладень при пульсуючому тиску, а також емпіричну математичну модель процесу їх фільтрування при статичному тиску. Виконано статистичний аналіз адекватності математичних моделей.

Отримані результати можуть бути використані при розробці фільтрувальних машин і технологічних процесів при пульсуючому і статичному тиску.

**Ключові слова:** дрібнодисперсна суспензія, фільтрування, пульсуючий тиск, багатофакторний експеримент, глибоководні органо-мінеральні відкладення.

*S.V. Tynina, A.E. Shevchenko, I.I. Chobotko.*

## **EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF THE FILTRATION PROCESS OF A TONKODISPERSE SUSPENSION AT PULSING PRESSURE**

The use of pulsed pressure in modern dewatering machines allows to increase the efficiency of dewatering fine suspension.

Results of theoretical and experimental investigations of the process of filtrating fine suspension with the use of pulsed pressure on an example of dewatering deep-sea organic-mineral sediments of the Black Sea are given.

Factors affecting the process for the case of the use of pulsed pressure, as well as their range, are determined. Design of experiment is performed. Regression model of the process of dewatering organic-mineral sediments with the use of pulsed pressure and empirical mathematical model of the appropriate process under static pressure are established. Statistical adequacy of the mathematical models obtained is determined.

The results obtained might be used for the development of dewatering machines, which work on the principle of using pulsed or static pressure, and determining parameters of appropriate technological processes.

**Keywords:** suspension, filtration process, pulsating pressure, marine organic-mineral sediments, filtrate.