Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 69, № 3. С. 37–49.
Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University. 2024. Vol. 69, no 3. P. 37–49.

ПИЩЕВЫЕ СИСТЕМЫ

Научная статья
УДК 66/544.032
DOI: doi.org/10.48612/dalrybvtuz/2024-69-04
EDN: FUCJEA

# Физическая и феноменологическая модели насыпного фильтра со встроенными механоактиваторами

**Александра Игоревна Крикун[1], Сергей Дмитриевич Руднев[2], Вероника Вячеславовна Феоктистова[3]**
[1, 3] Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет, Владивосток, Россия
[2] Кемеровский государственный медицинский университет Минздрава России, Кемерово, Россия
[1] aleksa13@list.ru, ORCID: 0000-0002-9330-2555
[2] sdrudnev@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2506-6121
[3] feonika13@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7680-2611

***Аннотация.*** Проведен теоретический анализ насыпного фильтрования с выделением наиболее значимых факторов, влияющих на пропускную способность и качество фильтрата; представлены результаты экспериментальной проверки влияния внешних механических воздействий на свойства воды, ее растворов и водных суспензий (дистиллированная вода, морская вода и меловая суспензия) на физических (стеклянных) моделях, а также исследования пропускной способности при фильтровании исходных и активированных (исходных водных суспензий с измененными свойствами) водных суспензий через естественно-уплотнённые и виброуплотнённые насыпные дисперсные среды. По результатам моделирования произведена модернизация экспериментальной установки (насыпного фильтра), предусматривающая включение в конструкцию виброактиватора для уплотнения фильтрующего слоя и механоактиватора для активации исходных водных суспензий перед процессом фильтрования. Построена феноменологическая модель данного фильтрующего устройства, представляющая собой комбинацию упругих и вязких элементов, на основе которой предложена расчетная модель, описывающая функционирование исследуемого объекта в физически содержательных терминах. Подведены итоги физического моделирования на экспериментальной установке – насыпном зернистом фильтре на предприятии ООО «Восток продукт».

***Ключевые слова:*** насыпное фильтрование, факторы, физическая модель, экспериментальная проверка, водные суспензии, феноменологическая модель, модернизация, насыпной фильтр, механоактивация, виброактивация

***Для цитирования:*** Крикун А. И., Руднев С. Д., Феоктистова В. В. Физическая и феноменологическая модели насыпного фильтра со встроенными механоактиваторами // Научные труды Дальрыбвтуза. 2024. Т. 69, № 3. С. 37–49.

© Крикун А. И., Руднев С. Д., Феоктистова В. В., 2024

FOOD SYSTEMS

Original article

# Physical and phenomenological models of a bulk filter with built-in mechanical activators

**Aleksandra I. Krikun[1], Sergey D. Rudnev[2], Veronika V. Feoktistova[3]**
[1, 3] Far Eastern State Technical Fisheries University, Vladivostok, Russia
[2] Kemerovo State Medical University of the Ministry of Health of Russia, Kemerovo, Russia
[1] aleksa13@list.ru, ORCID: 0000-0002-9330-2555
[2] sdrudnev@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-2506-6121
[3] feonika13@mail.ru, ORCID: 0000-0002-7680-2611

***Abstract.*** The article presents a theoretical analysis of bulk filtration, highlighting the most significant factors influencing throughput and the quality of the filtrate. Additionally, it discusses the results of an experimental test on the influence of external mechanical effects on the properties of water, its solutions, and aqueous suspensions (distilled water, seawater, and chalk suspension) using physical (glass) models. The study also examines the throughput capacity during filtration of both initial and activated aqueous suspensions (those with modified properties) through naturally compacted and vibrationally compacted bulk dispersed media. Based on the modeling results, the experimental setup (bulk filter) was modernized to include a vibration activator for compacting the filter layer and a mechanical activator for activating the initial aqueous suspensions before filtration. A phenomenological model of this filtering device was constructed, combining elastic and viscous elements. From this, a calculation model was proposed, describing the functioning of the object under study in physically meaningful terms. Finally, the results of physical modeling on an experimental setup—a bulk granular filter at the LLC enterprise Vostok Product — were summarized.

***Keywords:*** bulk filtration, factors, physical model, experimental testing, aqueous suspensions, phenomenological model, modernization, bulk filter, mechanical activation, vibration activation

***For citation****:* Krikun A. I., Rudnev S. D., Feoktistova V. V. Physical and phenomenological models of a bulk filter with built-in mechanical activators. *Scientific Journal of the Far Eastern State Technical Fisheries University.* 2024; 69(3): 37–49. (in Russ.).

## Введение

Одним из крупнейших водопотребителей и объектом образования специфически загрязнённых стоков являются рыбоперерабывающие предприятия. Для данного типа предприятий важное значение имеет вода, являющаяся незаменимым элементом производственного процесса, которая должна быть повышенного качества и соответствовать предъявляемым к ней требованиям. Применение морской воды в технологических целях в процессах мойки и технологической обработки рыбы – потрошения и разделки – повышает её вкусовые качества и пищевую ценность. Промывка разделываемой рыбы морской водой позволяет сохранить нативный катионный состав межклеточной жидкости продукта, в первую очередь $Na^+$, $K^+$, $Mg^+$, жизненно необходимые организму человека.

Важнейшей стадией подготовки воды к использованию является удаление всех видов примесей, как твердых, так и находящихся в коллоидном состоянии. Это органические

вещества, состоящие из особых элементов – результатов естественных биологических процессов в океане и аллохтонных составляющих. Они возникают при влиянии сторонних факторов, в том числе человеческого воздействия [1].

Для удобства изложения материала условимся применять аббревиатуру ТМП – твёрдые механические примеси. Природа весьма эффективно использует насыпное фильтрование, когда очистка воды осуществляется через массивы насыпных песчано-гравийных сред, состоящих из частиц разной дисперсности и различного состава. Развитие теории и практики фильтрования сквозь насыпные дисперсные среды (далее, НДС) с различными свойствами (гранулометрическими, физико-химическими и сорбционными) представляется актуальной задачей. Интенсификация данного процесса – важная прикладная задача, для решения которой необходима синергия имеющихся теоретических основ, современного опыта, наработок, а также поиск новых подходов в совершенствовании методов фильтрования. Исходя из этого одним из перспективных способов повышения не только производительности процесса фильтрования, а также изменения свойств жидкости (влияющих на качество фильтрата) является механоактивация (далее, МА), позволяющая преобразовать ее энергетическое состояние при фильтровании.

В настоящее время при исследовании процессов пищевых производств (в том числе, процесса фильтрования) активно и успешно применяются различные методы моделирования. Движение жидкостей можно было бы описать, решая задачу о движении совокупности молекул (а также дисперсных частиц с потоком жидкости), заключенных в рассматриваемом объеме, на основе классической или квантовой механики. Однако, так как число молекул (а также дисперсных частиц с потоком жидкости) в единице объема чрезвычайно велико, то такая задача практически не разрешима. Начальные условия такой задачи (координаты и скорость всех молекул в начальный момент времени) не могут быть заданы. Даже если бы решение этой задачи могло быть получено, оно содержало бы огромное количество избыточной информации, поскольку на практике представляют интерес только некоторые осредненные величины (например, расход жидкости при фильтровании). Поэтому необходимо выбрать такой подход, при использовании которого жидкость рассматривают как непрерывно распределенную по пространству (сплошную) среду, обладающую физическими свойствами реальной жидкости (жидкости, характеризующейся вязкостью) [2, с. 9, с. 293; 3].

Одним из наиболее универсальных, простых и общных методов моделирования процессов является феноменологический метод, описывающий явления в общем виде и позволяющий достоверно раскрыть реологическое поведение среды, стать исходной основой для дальнейших исследований [4; 5, с. 53, 54].

**Обзор литературы**

Как показывают многочисленные работы авторов: В.З. Мельцера [6], Д.М. Минца [7], П.В. Сперанского [8], В.А. Успенского [9], А.И. Крикун [10], Н.М. Самохвалова [11], A. Cescon [12], N. Hasolli [13] и др., основным направлением исследований в теории насыпного фильтрования является повышение пропускной способности ($П$, м/с) с сохранением качества фильтрата (сокращение ТМП, ppm), понижение гидравлического сопротивления ($R$, м$^{-1}$). Очистка насыпным фильтрованием заключается в отделении ТМП из исходной водной суспензии (далее, ИВС) при прохождении через НДС с определенной толщиной слоя ($H_{iC}$, м).

Движение через неподвижный слой НДС различной формы, размеров и плотности подчиняется единым закономерностям.

В общем случае течение загрязненной ньютоновской жидкости (далее, жидкости) через НДС с толщиной слоя $H_{iC}$ можно описать уравнением Дарси в дифференциальной форме, уравнение (1):

$$\frac{dV}{S \cdot d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu_Ж \cdot R}, \tag{1}$$

где $dV/S{\cdot}\tau = П$; $V$ – объем фильтрата, м$^3$; $S$ – поверхность НДС (площадь живого сечения), м$^2$; $\mu_Ж$ – динамическая вязкость жидкости, Па·с; $\tau$ – время фильтрования, с; $R=R_{ФП}+R_O$, $R_{ФП}$ и $R_O$ – гидравлические сопротивления фильтрующей перегородки (далее, ФП) и слоя осадка, м$^{-1}$; $\Delta P$ – движущая сила процесса насыпного фильтрования, Па. $\Delta P$ создает разницу давлений между верхней ($P_1$) и нижней ($P_2$) сторонами ФП, и это позволяет жидкости проникать сквозь НДС. Основными способами достижения $\Delta P$ являются: сила тяжести $G$, Н; избыточное давление ($P_{ИЗБ}$, Па) на стороне ИВС. $\Delta P$ тем больше, чем выше $P_{ИЗБ}$ в герметически закрытом аппарате (насыпном фильтре).

Преобразуем уравнение (1), используя уравнение Гагена-Пуазейля:

$$\frac{4dV}{\pi \cdot d^2 \cdot d\tau} = \frac{\Delta P}{\mu_Ж \left( r_O \cdot x_O \dfrac{4V}{\pi \cdot d^2} + \dfrac{16V}{K_П \cdot \tau \cdot (\pi \cdot d^2)^2} \right)}, \tag{2}$$

где $d$ – диаметр ФП, м; $r_o$ – удельное объемное сопротивление осадка, м$^{-2}$; $x_O$ – количество осадка, м$^3$; $k_П$ – коэффициент проницаемости НДС, м.

Для НДС коэффициент $k_П$ зависит только от их свойств (но не от свойств ИВС) и определяется, в основном, геометрией порового пространства, в соответствии с этим модифицируем известное в теории фильтрования уравнение:

$$k_П = \frac{d_Ч^{\,2} \cdot S_{УД} \cdot \cos\theta}{8\mu_Ж \cdot \varepsilon} \cdot \left( \frac{\gamma_{НДС}}{\gamma_Ж} \right)^n, \tag{3}$$

где $d_Ч$ – диаметр частиц НДС, м; $\theta$ – контактный угол между поверхностью НДС и ИВС, рад; $\varepsilon$ – порозность, %; $\gamma_{НДС}$, $\gamma_Ж$ – поверхностные энергии смачиваемости НДС и ИВС на НДС, Дж/м²; $n$ – коэффициент, учитывающий дополнительные эффекты, такие как капиллярные силы; $S_{УД}$ – удельная поверхность, м$^2$/м$^3$:

$$S_{УД} = \frac{S}{V_{НДС}} = \frac{6}{d_Ч \cdot \rho_{НДС}}, \tag{4}$$

где $\rho_{НДС}$ – плотность НДС; кг/м$^3$; $V_{НДС}$ – объем НДС, м$^3$; $S$ – площадь живого сечения, м$^2$.

Поскольку движение жидкости через неподвижные НДС различной формы подчиняются единым закономерностям, перепишем уравнение (2), выразив разницу давлений $\Delta P$, коэффициент проницаемости $k_П$ и удельную поверхность $S_{УД}$ через параметры, существенно влияющие на способность пористых НДС пропускать или удерживать ТМП:

$$\frac{4dV}{\pi \cdot d^2 \cdot d\tau} = \frac{4 \cdot \mu_Ж \cdot V}{\pi \cdot d^2 \cdot \varepsilon \cdot \mu_Ж \left( r_O \cdot x_O \frac{4V}{\pi \cdot d^2} + \frac{16V}{\frac{d_Ч^{\,2} \cdot 6 \cdot \cos\theta}{8\mu_Ж \cdot \varepsilon \cdot d_Ч \cdot \rho_{НДС}} \cdot \left( \frac{\gamma_{НДС}}{\gamma_Ж} \right)^n \cdot \tau \cdot (\pi \cdot d^2)^2} \right)}. \quad (5)$$

Уравнения (1)–(5) позволили определить параметры жидкости (ИВС) и НДС, влияющие на пропускную способность *П* и гидравлическое сопротивление *R*, определить направление для их изменения. *П* и *R* имеют прямую зависимость: к увеличению *П* приводит уменьшение *R*. На сопротивление *R* влияют следующие параметры: порозность $\varepsilon$; диаметр частиц $d_Ч$, плотность $\rho_{НДС}$ и толщина слоя $H_С$ НДС; динамическая вязкость жидкости $\mu_Ж$; поверхностные энергии смачиваемости $\gamma_{НДС}$, $\gamma_Ж$; удельная поверхность $S_{УД}$; разница давлений $\Delta P$ и др. Параметрами, на которые можно влиять для снижения сопротивления *R* при насыпном фильтровании (что делает их наиболее значимыми), являются: для ИВС – снижение вязкости $\mu_Ж$ и поверхностного натяжения $\sigma_Ж$; для НДС – снижение порозности $\varepsilon$, повышение удельной поверхности $S_{УД}$ [2].

На основании результатов исследований таких ведущих ученых, как: И.И. Блехман [14], И.Ф. Гончаревич [15], С.Д. Руднев [16], Ю.И. Иориш [17], Д.И. Менделеев [18], А. Смекал [19], П.А. Ребиндер [20] и др. – можно предположить, что достичь изменения этих параметров возможно путем их МА (в том числе виброактивации – далее, ВА). Это связано с тем, что МА запускает ускорение физико-химических процессов. Непосредственные механические воздействия на жидкость могут привести молекулярные образования к неупорядоченному состоянию, ослаблению, разрыву межмолекулярных связей и самоорганизации до достижения энергетического равновесного состояния (гигантские гетерофазные кластеры воды разбиваются на множество кластеров малых размеров), в этот момент может наблюдаться снижение вязкости $\mu_Ж$ и поверхностного натяжения ($\sigma_Ж$) и пр. Вибрационные воздействия на твердые тела (НДС) могут позволить перемешивать, сегрегировать или уплотнять их, что может положительно сказываться на процессе фильтрования: 1) при перемешивании может обеспечиваться однородность фильтрующего слоя; 2) при сегрегации – облегчиться процесс регенерации в режиме промывки; 3) при уплотнении – происходить сжатие и вытеснение воздуха из НДС (уменьшаться порозность $\varepsilon$, повышаться удельная поверхность $S_{УД}$), что позволит уловить более мелкие ТМП; предотвратить обратный проток фильтруемой жидкости. Требуется экспериментальная проверка.

**Материалы и методы**

По ходу проведения экспериментальной проверки влияния внешних механических воздействий на свойства воды, водных растворов и НДС на физических (стеклянных) моделях определены следующие задачи: установление влияния внешних механических воздействий на свойства ИВС; исследование пропускной способности при фильтровании исходных и активированных водных суспензий (ИВС с измененными свойствами, далее, АВС) под действием МА через пористые материалы.

На основании результатов, полученных при решении поставленных задач экспериментальной проверки, установили: достаточное время воздействия МА на *воду* и водные растворы для снижения поверхностного натяжения $\sigma$ (на 30–45 %) и вязкости $\nu$ (до 40 %) лежит в промежутке от 10–20 с; при исследовании пропускной способности при фильтровании ИВС и АВС через пористые материалы (фильтровальные бумагу, ткань, естественно-уплотненные (далее, ЕУП) и виброуплотненные (далее, ВУП) НДС) отмечается рост *П* фильтров: бумажный фильтр: *вода* (на 10-15 %); *суспензия* (до 25 %); *морская вода* (до 40 %); тканевый фильтр: *вода* (до 20 %); *суспензия* (до 25 %); *морская вода* (на 20–25 %); насыпной фильтр (*морская вода*): АВС через ВУП НДС по сравнению с АВС через ЕУП НДС до 30 %, на 40–45 % по сравнению с ИВС через ВУП НДС на 55–60 % и по сравнению с ИВС через ЕУП НДС (*эффект от совместного воздействия механоактиваторов на ИВС и виброактиваторов на НДС*), ТМП сократилось до 45 %.

На данные результаты могло повлиять изменение следующих параметров: удельная поверхность $S_{уд}$ и плотность НДС $\rho_{НДС}$ увеличились на 15–20 %; порозность $\varepsilon$ уменьшилась на 20–25 %, толщина слоя $H_c$ и объем $V_{НДС}$ НДС – на 15–20%, коэффициент проницаемости $k_П$ – до 35 %, поверхностные энергии смачиваемости $\gamma_{НДС}$ – на 10–15 % и $\gamma_Ж$ – до 25 %, гидравлическое сопротивление $R$ до 55 % [3].

Полученные данные позволили приступить к модернизации экспериментальной установки (насыпного фильтрующего устройства). Основной целью которой являлось повышение пропускной способности, без потери качества очистки и увеличения себестоимости процесса. На рис. 1 представлена принципиальная схема фильтрующего устройства со встроенными механоактиваторами и виброактиваторами.

Устройство включает цилиндрический корпус (1), покрытый внутри и снаружи специальной антикоррозийной краской (с учетом агрессивных свойств морской воды), с верхним (2) и нижним резервуарами (3). В верхней части устройства установлены встроенные механоактиваторы (4) в виде пластинчатых ножей (*данная форма ножей была подобрана экспериментальным путем, показав свою эффективность*), обеспечивающие послойное диспергирование морской воды, подаваемой на фильтрование вместе с примесями в них, со скоростью $\omega$=2000 мин$^{-1}$. Фильтр предусматривает патрубок для подачи ИВС (5) и отвода фильтрата (6), симметричные патрубки для отвода промывной воды (7). Во внутренней части устройства засыпаны слои НДС естественного происхождения (8, 9, 10) на сетчатую разделительную перегородку (11), с уплотнительным резиновым контуром (12), устойчивым к воздействию агрессивных сред. Эксцентриковые виброактиваторы (13) передают сетчатой разделительной перегородке (11) колебания с амплитудой $A$ до 5,5 мм и частотой $f$ до 55 Гц: при $A$ = 1÷2,5·мм и $f$ = 25÷35 Гц – происходит виброуплотнение НДС; при $A \geq 3{,}1$·мм и $f \geq 39$ Гц происходит виброперемешивание НДС (необходимо при регенерации) [3].

Устройство снабжено парой струнных пьезометров, подключенных к дисплею для контроля измерений (14), датчиками измерения растворенных ТМП («total dissolved solids», на рисунке обозначено, TDS, ppm), температуры (15) для контроля показателей до и после процесса фильтрования. На верхнем резервуаре закреплен пульт управления (16), устройство оснащено функцией освещения, имея соответствующую кнопку включения на пульте управления (17).

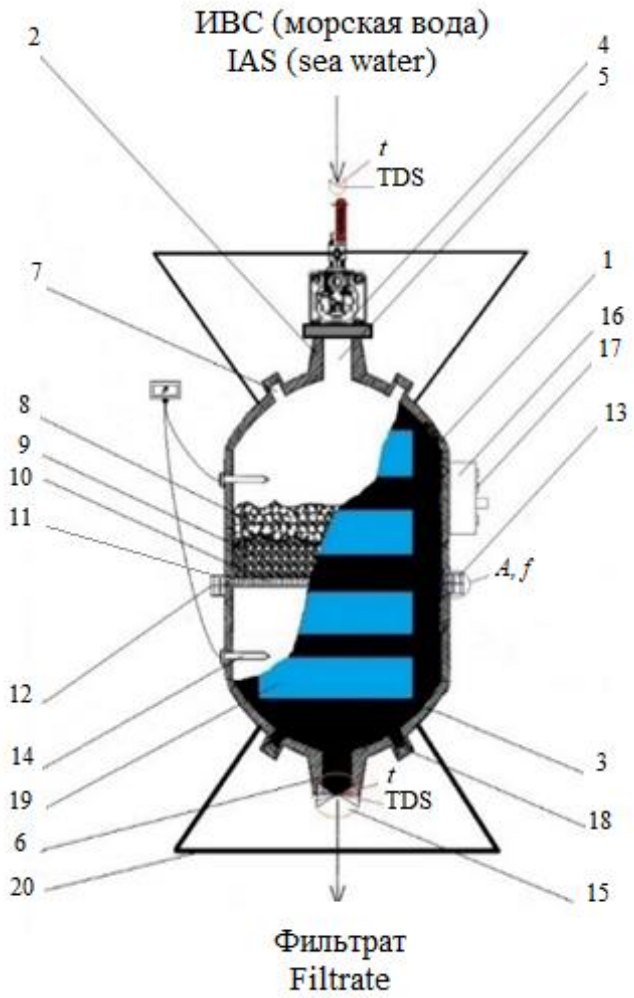


Рис. 1. Принципиальная схема модернизированной экспериментальной установки: ИВС – исходная водная суспензия. Составлено авторами
Fig. 1. Schematic diagram of the modernized experimental setup: IAS – initial aqueous suspension. Compiled by the authors

При необходимости регенерации фильтрующей загрузки через симметричные патрубки подвода промывной воды (18) под напором подается вода, а также включаются виброактиваторы (13), обеспечивающие виброразрыхленее НДС. Установка включает четыре смотровых окна (19), выполненных из оргстекла в два слоя, между которыми встроена подсветка из светодиодов. Устройство расположено на эргономичной опоре (20).

**Результаты и их обсуждение**

Построена *феноменологическая модель* исследуемого объекта (фильтрующего устройства со встроенными механоактиваторами и виброактиваторами), рис. 2, представляющая собой комбинацию упругих (пружина) и вязких (поршень) элементов.

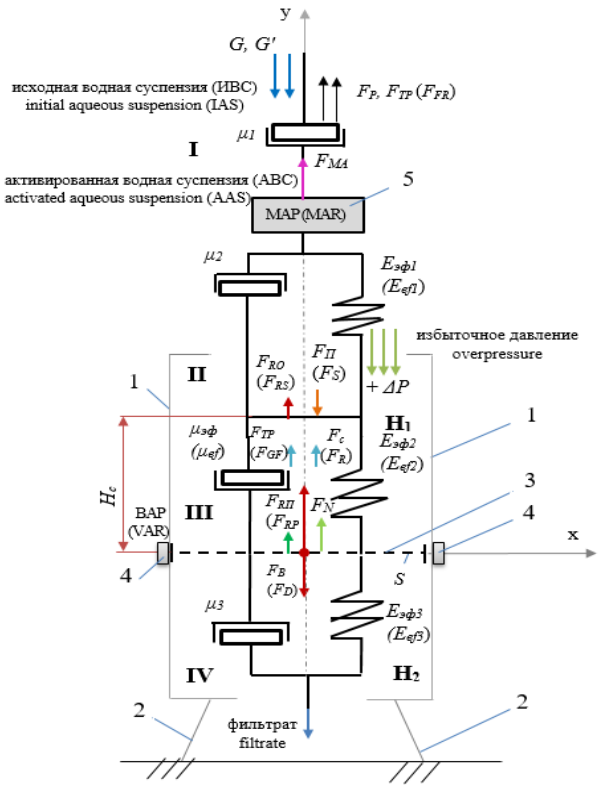


Рис. 2. Расчетная модель исследуемого объекта (насыпного фильтра со встроенными виброактиваторами и механоактиваторами): x, y – оси координат; $G$ – сила тяжести; $G'$ – объемная (массовая) дальнодействующая сила, действующая на каждый элемент объема жидкости (инертная сила); МАР – механоактиваторы; $F_P$ – сила давления; $F_{TP}$ – сила трения; $F_{MA}$ – воздействие механоактиваторами; $F_B$ – возмущающая сила; $F_N$ – нормальная сила; $\mu_1$, $\mu_2$, $\mu_3$ – динамические вязкости ИВС и АВС (морской воды), а также фильтрата; $\mu_{эф}$ – эффективная динамическая вязкость; $E_{эф1}$, $E_{эф2}$, $E_{эф3}$ – эффективные модули упругости; $\Delta P$ – разность давлений, Па; ВАР – виброактиваторы; $F_П$ – поверхностная сила, действующая со стороны потока фильтруемой суспензии на элементы поверхности верхнего слоя ВУП НДС; $F_{RП}$, $F_{RO}$ – гидравлическое сопротивление ФП и слоя осадка; $F_{TP}$ – сила общего трения, приходящаяся на единицу объема порового пространства; $F_C$ – сила сопротивления; $S$ – площадь живого сечения, м$^2$; I – вязкое состояние ИВС (морской воды); II – вязкоупругое состояние АВС (морской воды), находящееся в знакопеременном силовом воздействии; III – вязкоупругое состояние водной суспензии при прохождении насыпной виброуплотненной зернистой перегородки; IV – вязкоупругое состояние фильтрата, находящееся в знакопеременном силовом воздействии. Составлено авторами

Fig. 2. Computational model of the object under study (bulk filter with built-in vibration activators and mechanical activators): x, y – coordinate axes; $G$ – gravity; $G'$ – volumetric (mass), a long-range force acting on each element of the liquid volume (inertial force); MAR – mechanical activators; $F_P$ – pressure force; $F_{FR}$ – friction force; $F_{MA}$ – influence by mechanical activators; $F_D$ – disturbing force; $F_N$ – normal force; $\mu_1$, $\mu_2$, $\mu_3$ – dynamic viscosities IAS and AAS (sea water), as well as filtrate; $\mu_{ef}$ – effective dynamic viscosity; $E_{ef1}$, $E_{ef2}$, $E_{ef3}$ – effective elastic moduli; $\Delta P$ – pressure difference, Pa; VAR – vibration activators; $F_S$ – surface force acting from the flow of the filtered suspension on the elements of the surface of the upper layer of vibration-compacted bulk dispersed media surface force acting from the flow of the filtered suspension on the elements of the surface of the upper layer of vibration-compacted bulk dispersed media; $F_{RP}$, $F_{RS}$ – hydraulic resistance of the filter partition and sediment layer; $F_{GF}$ – force of general friction per unit volume of pore space; $F_R$ – resistance force; $S$ – living section area, m$^2$; I – viscous state of the IAS (sea water); II – viscoelastic state of an AAS (sea water) subjected to alternating force action, under alternating force influence; III – viscoelastic state of aqueous suspension during passage of bulk vibration compaction of granular partition; IV – viscoelastic state of the filtrate, which is under alternating force action. Compiled by the authors

Представленная система состоит из корпуса со стенками – идеальными направляющими (1), расположенными параллельно оси «у». Под (2) обозначено эргономичное основание. Стенки (1) ограничивают движение рабочего органа/тела – вибрирующей перегородки (3) массой $m$ (непосредственно сама виброперегородка с расположенным на ней НДС и площадью живого сечения $S$, расположенной на оси «х»).

Перегородка (3) разделяет объект на верхний резервуар $H_1$ и нижний $H_2$, колебания ей передаются от виброактиваторов эксцентрикового типа (4). Под (5) обозначены встроенные механоактиваторы, МА в которых обеспечивается диспергированием. Элементы (4) и (5) делают модель отличной от стандартной (в такой конструкции перегородка (3) выполняет только функцию разделения, но не является рабочим органом/телом; не предусмотрены активирующие ИВС устройства).

Составлена *феноменологическая модель* исследуемого объекта, на основе которой предложена расчетная модель. Опишем работу модели пошагово.

Перед началом процесса фильтрования на перегородку (3) с площадью живого сечения $S$, м$^2$ засыпаются несколько разных видов НДС различной дисперсности $D_{НДСi}$ и плотности $\rho_{НДСi}$ общей толщиной слоя $H_C$, образуется естественное уплотнение НДС, которое можно описать с помощью уравнения для пластичной деформации материалов:

$$\sigma_{НДС} = k \cdot \zeta^n, \tag{6}$$

где $\sigma_{НДС}$ – напряжение уплотнения НДС; $\zeta$ – деформация (относительное увеличение $V_{НДС}$ – общего объема, занимаемого слоем НДС; $k$ – коэффициент пропорциональности; $n$ – показатель пластичности.

Допустим: 1) *морской гравий* (с размером частиц $d_{Ч1}$, толщиной слоя $h_{НДС1}$, объемом $V_{НДС1}$, плотностью $\rho_{НДС1}$ и площадью основания слоя $S_{НДС1}$); 2) *морская галька* (с $d_{Ч2}$, $h_{НДС2}$, $V_{НДС2}$, $\rho_{НДС2}$ и $S_{НДС2}$); 3) *морской песок* (с $d_{Ч3}$, $h_{НДС3}$, $V_{НДС3}$, $\rho_{НДС3}$ и $S_{НДС3}$). Данные НДС выбраны нами, поскольку имеют естественное происхождение и находятся в прямой доступности для береговых рыбоперерабатывающих предприятий.

Возникает необходимость обеспечить толщину слоя $H_C$ и порозность $\varepsilon$, при которых: пропускная способность $П$ повышается, гидравлическое сопротивление $R$ и содержание ТМП в фильтрате снижается. Поскольку могут возникнуть следующие противоречия: 1) при увеличении $H_C$ может повышаться пропускная способность, гидравлическое сопротивление и качество фильтрата; при увеличении $\varepsilon$ может повышаться пропускная способность и гидравлическое сопротивление снижается, но ухудшается качество фильтрата.

Зададим следующие условия, пусть: 1) $d_{Ч1} \neq d_{Ч2} \neq d_{Ч3}$; 2) $h_{НДС1}=h_{НДС2}=h_{НДС3}$; 3) $V_{НДС1}=V_{НДС2}=V_{НДС3}$; $\rho_{НДС1} \neq \rho_{НДС2} \neq \rho_{НДС3}$; 4) $S_{НДС1}=S_{НДС2}=S_{НДС3}=S$. Это важное условие, поскольку многослойное фильтрование эффективнее однослойного.

Согласно известной формуле $\varepsilon$ (объемная доля пустот)

$$\varepsilon = \frac{V_{НДС} - V_T}{V_{НДС}}, \tag{7}$$

где $V_{НДС}$ – общий объем, занимаемый слоем НДС, представляющий собой $V_{НДС1}+V_{НДС2}+V_{НДС3}$, м$^3$; $V_T$ – объем твердых частиц НДС в слое, м$^3$; $V_{НДС} - V_T = V_П$ – объем пор, м$^3$, изменяя который можно влиять на $\varepsilon$:

$$V_П = (1 - \frac{\rho_{НДС}}{\rho_И}) \cdot 100\%, \tag{8}$$

где $\rho_{НДС}$ – плотность НДС, кг/м$^3$; $\rho_И$ – истинная плотность НДС, кг/м$^3$.

Уравнение (7) для *естественного уплотнения* примет следующий вид:

$$\varepsilon = \frac{V_B}{S \cdot H_C}, \tag{9}$$

где $V_B$ – объем воздуха, сократившийся в процессе естественного уплотнения.

На основании многочисленных исследований ведущих ученых в области насыпного фильтрования (В.З. Мельцер [6], Д.М. Минц [7], П.В. Сперанский [8], В.А. Успенский [9], А.И. Крикун [10], С.Г. Тихомиров [21], Н.И. Ватин [22] и др.), ранее полученных результатов исследования и дополнительной серии экспериментов можно утверждать, что: установку целесообразно заполнить НДС на 2/3 высоты верхнего резервуара $H_1$, поскольку при данном количестве НДС в фильтре обеспечивается наиболее рациональное изменение показателей при фильтровании: пропускная способность повышается, гидравлическое сопротивление и ТМП в фильтрате снижаются, а также разность давлений ΔР (в $H_1$ остается достаточно места для поддержания стабильного потока ИВС и АВС, исключая переполнение). Поскольку при $Hc < 2/3H_1$ пропускная способность повышается, однако ТМП в фильтрате то же, гидравлическое сопротивление и разность давлений снижаются; при $>2/3H_1$ пропускная способность и ТМП в фильтрате снижаются, гидравлическое сопротивление и разность давлений увеличиваются; естественного уплотнения НДС при многослойном фильтровании не достаточно, в модель (см. рис. 2) включены виброактиваторы (4), *основной задачей* внедрения которых является обеспечение виброуплотнения слоя НДС ($\varepsilon$ и гидравлическое сопротивление снижаются, пропускная способность и удельная поверхность $S_{УД}$ увеличиваются).

Опишем процесс виброуплотнения НДС: симметрично расположенные виброактиваторы (4) передают колебания перегородке (3) определенной амплитуды $A_i$ и частоты $f_i$ с расположенными на ней ЕУП НДС, делая ее рабочим органом, обладающей возмущающей силой $F_B$. Для определения которой можно использовать закон Ньютона второго закона движения, учитывающий массу НДС ($m_{НДС}$, кг), расположенных на перегородке (3):

$$F_B(t) = m_{НДС} \cdot a_{НДС}(t) + F_B(t) - F_B(t), \tag{10}$$

где $t$ – момент времени $t$; $a_{НДС}$ – ускорение НДС; $F_B$ – возмущающие силы, направленные вверх (по направлению оси у) и вниз (противоположно направлению оси у); $m$ – масса перегородки (3) с расположенными на ней НДС; $m_П$ – масса перегородки (3); $m$ – общая сумма НДСи перегородки (3).

Очевидно, что колебания перегородки (3) не будут гармоническими из-за неоднородности НДС, наличия диссипативных сил и нелинейных эффектов. Отсюда $F_B(t)$, направленная вверх, будет больше $F_B(t)$, направленной вниз (система находится в поле силы тяжести $G$; НДС под воздействием вибрации перемещаются в различных направлениях и др.).

Поскольку колебания перегородки (3) в процессе фильтрования могут привести к отрицательному эффекту (способствовать виброразрыхлению и легкому прохождению ТМП в фильтрат, данный эффект необходим в случае промывки противотоком после процесса фильтрования), достигнув виброуплотнения слоя, перегородке (3) перестают подаваться колебания ($A$, $f$ равны 0, а следовательно, и $F_B$=0), под действием $G$ и $G'$ ИВС (морская вода вместе с примесями в ней) направляется в $H_1$ на фильтрование. ИВС имеет коэффициент динамической вязкости $\mu_1$ (изображено в виде вязкого элемента – поршня – классическое изображение жидкости) и плотность $\rho_1$.

На основании многочисленных исследований таких ученых, как: П.Ф. Овчинников [23], Е.А. Кирсанов [24], Н.А. Беляева [25], С.Н. Литунов [26] и др., результатов исследования и дополнительной серии экспериментов можно утверждать, что включение в модель механоактиваторов (5), расположенных перед $H_1$, оправданно. Их основной функцией является послойное диспергирование ИВС, подаваемой на фильтрование – сила $F_{МА}$. Эта сила вызывает появление

тиксотропных свойств у ИВС (временное снижение $\mu$ ИВС на много порядков – разрушение структуры превышает ее восстановление за счет броуновского движения).

Опишем процесс механоактивации ИВС: попадая под воздействие механоактиваторов (5) происходят изменения в исходной водной суспензии (создаются сдвиговые деформации (течение) в слоях, что приводит к разрыву межмолекулярных связей, внутренняя энергия системы $E_B$ увеличивается, σ и $\mu$ снижаются и др., примеси изменяют свою форму и размеры). Исходная водная суспензия переходит в вязкоупругое состояние (активированная водная суспензия). На рис. 2 изображено как параллельная связь упругого элемента – пружины и вязкого элемента – поршня (коэффициент динамической вязкости $\mu_2$ и эффективный модуль упругости $Eэф_1$).

На основании анализа работ А.А. Фроловой [27], С.В. Шешенина [28], В.А. Богомолова [29] и др. переход ИВС от вязкого состояния $\mu_1$ к вязкоупругому ($\mu_2$, $Eэф_1$) может быть описан с помощью модели Максвелла или модели Максвелла-Возерса:

$$\sigma_{\Sigma} = \mu_2 \cdot \left(\frac{\partial w}{\partial t}\right) + E_{эф1} \cdot \left(\frac{\partial \xi}{\partial t}\right), \tag{11}$$

где $\sigma_{\Sigma}$ – общее напряжение, где $\sigma_{\mu 2}$ – напряжение, вызванное вязкостью; $\sigma_{Eэф1}$ – напряжение, вызванное упругостью; $\mu_2$ – коэффициент вязкости с полностью разрушенной структурой; $\partial w/\partial t$ – скорость изменения скорости; $\partial \xi/\partial t$ – скорость изменения деформации.

Далее опишем процесс фильтрования АВС ($\mu_2$, $Eэф_1$) через ВУП НДС. Проходя через слои ВУП НДС, АВС разбивается на многочисленные каналы. Течение маловязкой жидкости в каналах малого сечения подобно тонкопленочному течению, при котором поверхностные силы взаимодействия начинают преобладать над объёмными, т.е. сдвиговому сопротивлению. Проявляется эффективная вязкость и вязкоупругость. На схеме состояние (III) изображено параллельной связью упругого элемента (пружины) и вязкого элемента – поршня, расположенных на перегородке (3), площадь живого сечения которой $S$. Ей свойственны эффективная вязкость $\mu_{эф}$ и эффективный модуль упругости $E_{эф2}$.

После прохождения насыпных дисперсных сред очищенная жидкость поступает в нижний резервуар $H_2$, сохраняя вязкоупругое состояние (IV), приобретенное под действием механоактиваторов (5) и течения в каналах сыпучей среды малого сечения. Модель в зоне (IV) показывает вязкоупругое состояние фильтрата (коэффициент динамической вязкости $\mu_3$ и эффективный модуль упругости $E_{эф3}$), находящегося в знакопеременном силовом воздействии. Далее фильтрат под действием $G$ покидает систему [3].

**Заключение**

Результаты физического моделирования на экспериментальной установке – насыпном зернистом фильтре, выполненное на базе предприятия ООО «Восток продукт», в присутствии их технических представителей, общей продолжительностью – 36 ч (*подписан и заверен акт об испытаниях*) показали: отмечается повышение $П$ при фильтровании морской воды: ИВС через ВУП НДС по сравнению с ЕУП НДС до 10 %; АВС через ЕУП НДС по сравнению с ИВС через ЕУП НДС до 15–20 % и до 10 % по сравнению с ИВС через ВУП НДС; АВС через ВУП НДС по сравнению с АВС через ЕУП НДС – до 20 %, на 30–40 % по сравнению с ИВС через ВУП НДС до 45 % и по сравнению с ИВС через ЕУП НДС. Рост пропускной способности связан в первую очередь со снижением вязкости, показывающем тиксотропное состояние водного раствора. Также установлено снижение ТМП до 80–85 % при фильтровании АВС (морской воды) через ВУП НДС. Это можно объяснить сокращением порозности $\varepsilon$ и ростом удельной поверхности $S_{уд}$ (способствует улавливанию более мелких ТМП).

Таким образом, полученные в результате экспериментов данные указывают на то, что модель (см. рис. 2) верно отражает поведение физических и химических процессов,

происходящих в системе, и может быть использована для прогнозирования поведения системы при изменении различных параметров.

## Список источников

1. Разбираем химический состав морской воды [Электронный ресурс] // О воде, способах ее очистки и улучшения качества, 2018–2024. Режим доступа: https://o-vode.net/kakaya-byvaet/morskaya/razbiraem-himicheskij-sostav.

2. Протодьяконов, И. О. Гидромеханические основы процессов химической технологии / И. О. Протодьяконов, Ю. Г. Чесноков. Л. : Химия, 1987. 360 с.

3. Феоктистова, В. В. Совершенствование процесса фильтрования морской воды насыпными дисперсными средами : научно-квалификационная работа: 4.3.3 Пищевые системы / Феоктистова Вероника Вячеславовна. Кемерово, 2024. 133 с.

4. Азбель, Г. Г. Вибрации в технике: справочник в 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Г. Г. Азбель, И. И. Блехман, И. И. Быховский, Л. А. Вайсберг и др.; под ред. Э. Э. Лавендела. М. : Машиностроение, 1981. 509 с.

5. Арет, В. А. Реология и физико-механические свойства материалов пищевой промышленности : учеб. пособие / В. А. Арет, С. Д. Руднев. Кемерово : Интермедия, 2014. 246 с. ISBN: 978-5-4383-0033-5.

6. Мельцер В. З. Исследование пористости зернистых фильтрующих материалов // Научные труды АКХ. М. : ОНТИ АКХ. 1973. Т. 98. С. 97–99.

7. Минц Д. М. Теоретические основы технологии очистки воды. М. : Стройиздат, 1964. 156 с.

8. Сперанский, П. В. Исследование местных зернистых материалов Уральского региона с целью их использования в качестве загрузки водоочистных фильтров : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / Сперанский Павел Владимирович. Екатеринбург, 2001. 187 с.

9. Успенский В. А. К теории и расчету слоевого фильтра // Инженерно-физический журнал. 1974. Т. 24, № 4. С. 740.

10. Крикун, А. И. Совершенствование процесса фильтрования воды на рыбоперерабатывающих предприятиях : дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / Крикун Александра Игоревна. Кемерово, 2017. 219 с.

11. Самохвалов Н. М. Прогнозирование вида фильтрования в зернистых фильтрах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 7(47). С. 165–169. EDN: NCGKMB.

12. Cescon A. Filtration Process and Alternative Filter Media Material in Water Treatment / A. Cescon, J.-Q. Jiang // Water. 2020. № 12(12). P. 3377. DOI:10.3390/w12123377.

13. Hasolli N. Filtration performance evaluation of depth filter media cartridges as function of layer structure and pleat count / N. Hasolli, Y.O. Park, Y.W. Rhee // Powder Technology. 2013. Vol. 237. P. 24–31. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.002.

14. Блехман И. И. Что может вибрация? О «вибрационной механике» и вибрационной технике. М. : ЛЕНАНД, 2017. 216 с. ISBN 978-5-9710-3582-4.

15. Гончаревич, И. Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности / И. Ф. Гончаревич, Н. В. Урье, М. А. Талейсник. М. : Пищ. пром-сть, 1977. 279 с.

16. Руднев, С. Д. Изменение свойств воды при её механоактивации / С. Д. Руднев, Т. В. Шевченко, И. Ю. Сергеева и др. // Актуальные направления научных исследований: технологии, качество и безопасность : сборник материалов Нац. (Всерос.) конф. 2020. С. 121–124.

17. Иориш Ю. И. Виброметрия. М. : Машиностроение, 1963. 772 с.

18. Менделеев, Д. И. Основы химии: в 4 т. / Д. И. Менделеев. М. : Изд-во «Юрайт», 2020. Т. 1. 310 с.

19. Молчанов, В. И. Активация минералов при измельчении / В. И. Молчанов, О. Г. Селезнева, Е. Н. Жирнов. М. : Недра, 1988. 208 с.

20. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика // Избранные труды. М. : Наука, 1979. 384 с.

21. Тихомиров, С. Г. Повышение эффективности фильтрующего оборудования для предотвращения загрязнения моря с судов : дис. ... канд. техн. наук: 25.00.36 / Тихомиров Сергей Георгиевич. СПб., 2006. 209 с.

22. Ватин, Н. И. Применение цеолитов клиноптилолитового типа для очистки природных вод / Н. И. Ватин, В. Н. Чечевичкин, А. В. Чечевичкин, Е. С. Шилова // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 2(37). С. 81–88. EDN: PXABMD.

23. Овчинников П. Ф. Виброрелогия : монография. Киев : Наукова думка, 1983. 272 с.

24. Кирсанов, Е. А. Неньютоновское течение структурированных систем. XIII. Тиксотропные свойства / Е. А. Кирсанов, Ю. Н. Тимошин // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2014. Т. 14, № 4. С. 30–39.

25. Беляева Н. А. Неоднородное течение структурированной жидкости // Математическое моделирование. 2006. Т. 18, № 6. С. 3–14.

26. Литунов, С. Н. Течение неньютоновской жидкости в несимметричном потоке / С. Н. Литунов, Ю. Д. Тощакова, В. В. Скитченко, О. Е. Сердюк // Омский научный вестник. 2015. № 2(140). С. 130–134.

27. Фролова А. А. Численное сравнение обобщенной модели Максвелла и модели Черчиньяни-Лэмпис // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2020. Т. 60, № 12. С. 2162–2176. EDN: AQCBDE.

28. Шешенин, С. В. Об определении параметров вязкоупругой модели Максвелла / С. В. Шешенин, И. М. Закалюкина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 9. С. 47–49. EDN:ZHQZSX.

29. Богомолов, В. А. Общий подход к решению линейных, трехмерных, вязкоупругих обобщенных моделей Максвелла / В. А. Богомолов, В. К. Жданюк, С. В. Богомолов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2011. № 54. С. 153–158. EDN:OUWTMH.

## Информация об авторах

А. И. Крикун – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические машины и оборудование», SPIN-код: 6217-9103, AuthorID: 946577.

С. Д. Руднев – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры медицинской, биологической физики и высшей математики, SPIN-код: 6389-7238, AuthorID: 423406.

В. В. Феоктистова – ведущий специалист, SPIN-код: 4146-3970, AuthorID: 998024.

## Information about the authors

A. I. Krikun – PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technological Machines and Equipment, SPIN-code: 6217-9103, AuthorID: 946577.

S. D. Rudnev – Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Medical, Biological Physics and Higher Mathematics, SPIN-code: 6389-7238, AuthorID: 423406.

V. V. Feoktistova – Leading Specialist, SPIN-code: 4146-3970, AuthorID: 998024.

Статья поступила в редакцию 12.09.2024; одобрена после рецензирования 17.09.2024; принята к публикации 30.09.2024.

The article was submitted 12.09.2024; approved after reviewing 17.09.2024; accepted for publication 30.09.2024.