

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ И ТРАНСПОРТНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ РЫБОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ОТРАСЛИ

---

---

УДК 66.067.15

**А.И. Крикун, С.Д. Угрюмова**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690078, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФИЛЬТРОВАНИЯ МОРСКОЙ ВОДЫ

*Проведено математическое моделирование процесса фильтрации в линии подготовки морской воды для предприятий рыбной отрасли на основании теории В.А. Панфилова. На основании имеющихся данных формировалась цепочка процессов технологического потока подготовки морской воды, полученная цепочка преобразовывалась в операторную модель. Проводилась оценка уровня целостности функционирующего технологического потока, по результатам оценки осуществлялась корректировка операторной модели, включающая уточнение содержания и последовательности выполнения технологических операций. Определение оптимальных параметров насыпных фильтров, на которых осуществляется процесс фильтрации морской воды, произведено на основе блок-схем алгоритма методом Зейделя.*

**Ключевые слова:** математическое моделирование, линия, морская вода, фильтр, методика, операторная модель, адекватность.

**A.I. Krikun, S.D. Ugryumova**

### MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES FILTERING SEA WATER

*Mathematical modeling of the filtering process in the line of preparation of sea water for fishing enterprises on the basis of the theory V.A. Panfilova. Based on available data formed chain of process flow desalination received the chain transformed into an operator model. The estimation of the level of integrity of the functioning of the process stream, the evaluation was carried out the adjustment of the operator model, including clarification of the content and sequence of technological operations. Determination of the optimal parameters of bulk filters, on which the sea water filtration process produced on the basis of a flowchart of the method of Seidel.*

**Key words:** mathematical modeling, line, sea water, filter technique, the operator model, adequacy.

#### **Введение**

Для решения задач оптимизации процесса фильтрации морской воды на однослойных и многослойных насыпных фильтрах необходима разработка математической модели. Полная математическая модель процесса включает основные параметры процесса, соотношения, связывающие основные параметры между собой, ограничения на процесс и критерии опти-

мальности. По экстремальным значениям критерия оптимальности предоставляется возможным определить соответствующие ему наиболее выгодные в технологическом или экономическом плане значения управляющих параметров [6, 10].

Разработка математической модели, адекватно описывающей процесс фильтрования морской воды в насыпных зернистых фильтрах, позволяющей определить параметры работы устройств, при которых достигается максимальная производительность фильтров и не происходит срыв зерен в фильтрат, являлась целью данной работы.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- автоматизирована и модернизирована типовая линия подготовки воды для Дальнего Востока, предусматривающая наличие большого количества контрольно-измерительных приборов;

- разработана операторная модель данной линии, произведена оценка возможности выхода из подсистем морской воды заданного качества [7, 9];

- построена математическая модель, описывающая процесс фильтрования в насыпных зернистых фильтрах относительно минимальной величины времени фильтрования ( $\tau$ , с) и максимальной удельной производительности однослойных и двухслойных насыпных фильтров ( $V_f$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>); произведена проверка адекватности полученной математической модели.

### **Объекты и методы**

Объектами исследования являлись автоматизированная и модернизированная технологическая линия подготовки морской воды и фильтрующее устройство, разработанное и сконструированное с участием авторов.

Математическое моделирование процесса фильтрования в линии подготовки морской воды производилось на основании теории В.А. Панфилова по двум направлениям: *статистическому* – на этапе исследования системы и ее подсистем (макромодель процесса) и *теоретическому* – на этапе исследования процесса, протекающего в насыпных зернистых фильтрах (микромодель процесса) [8].

Пробы морской воды (для исследования) отбирались в соответствии с действующими методиками [2–5] в 16 различных точках зал. Петра Великого: бухты Лазурная (Шамора), Стеклянная, Сухопутная (Тихая), Мелководная, Песчаная и Угловая (п-ов Де-Фриз), бухты Врангель, Находка, о. Попова (ю. побережье), бухта Новик (о. Русский), о. Елена (пролив Босфор Восточный), бухты Троица, Экспедиции, Рейд Паллада, Северная и Табунная (Безверхово).

### **Результаты и их обсуждение**

Для исследования макромодели процесса фильтрования была автоматизирована и модернизирована линия подготовки морской воды для береговых предприятий рыбной отрасли, предусматривающая наличие большого количества контрольно-измерительных приборов: мутномеры, обеспечивающие непрерывный контроль мутности в диапазоне 50÷100 ЕМФ (30÷60 мг/л по каолину); анализаторы химического состава и взвешенных механических примесей морской воды; сигнализирующие датчики кислотности, кислородосодержания, солености, температуры, расхода объема и уровня фильтрата и слоя засыпки.

На основании имеющихся данных разработана операторную модель (рис. 1, табл. 1).

Таблица 1

**Условные обозначения моделей в линии подготовки морской воды**

Table 1

**Symbols of the models in the line of preparation of sea water**

Технологическая операция	Условные обозначения	Технологическая операция	Условные обозначения
Временное хранение (емкости, фильтры, отстойники и др.)		Водозабор (морской)	
Соединение без сохранения поверхности раздела (смешивание сред)		Соединение с сохранением поверхности раздела (образование осадка)	
Разделение на фракции (морская вода, осадок)		Термостатирование (в зависимости от вида гидробионтов)	

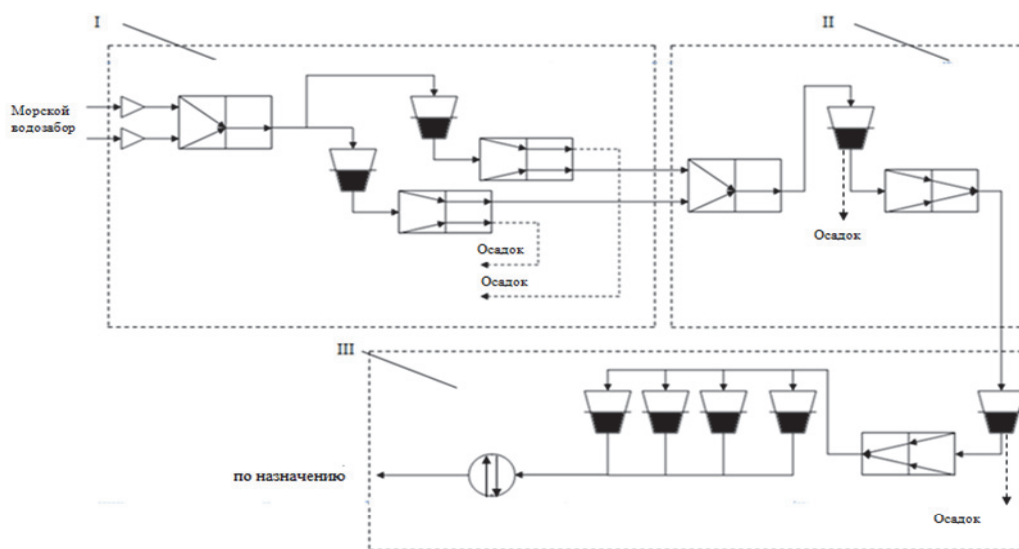


Рис. 1. Операторная модель управления линии подготовки морской воды [9]: I – морской водозабор и механическая очистка морской воды; II – грубая очистка морской воды; III – тонкая очистка морской воды и хранение

Fig. 1. An operator model for the control line desalination [9]: I – the sea water intake and mechanical cleaning of seawater; II – coarse cleaning of sea water; III – fine purification of sea water and storage

Оценивалась каждая из трех подсистем операторной модели управления линии подготовки морской воды для культивирования гидробионтов в отдельности, рассчитывалась вероятность выхода фильтрата заданного качества ( $P_i, \%$ ). Результаты возможности выхода из подсистем морской воды (фильтрата) заданного качества представлены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты возможности выхода из подсистем фильтрата заданного качества**

Table 2

**The results of exit opportunities given quality filtrate subsystems**

Подсистема		Вероятность выхода из каждой подсистемы морской воды необходимого качества $P_i, \%$
1	2	3
I	Механическая очистка морской воды	$P_1 = 98,5$

Окончание табл. 2

1	2	3
II	Грубая очистка морской воды	$P_{II} = 98,5$
III	Тонкая очистка морской воды и хранение	$P_{III} = 99$
	Система	Общая вероятность выхода из системы морской воды заданного качества $P_{общ} = 98,6 \%$

Проводилась оценка уровня целостности функционирующего технологического потока; по результатам оценки осуществлялась корректировка операторной модели, включающая уточнение содержания и последовательности выполнения технологических операций.

Поскольку в процессе эксплуатации разработанной нами экспериментальной установки (рис. 2) процесс фильтрования морской воды протекал с образованием осадка, то скорость фильтрования ( $v$ , м/с) определялась по общему дифференциальному уравнению процесса (уравнению Рута-Кармана):

$$v = \frac{d\Omega}{d\tau_s} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{\phi n} + R_{oc})} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{\phi n} + x_o r_o \Omega)}, \quad (1)$$

где  $\tau_s$  – продолжительность фильтрования (опред. экспериментально), с;  $F_\phi$  – поверхность фильтрования (опред. экспериментально), м<sup>2</sup>;  $V$  – объем фильтрата (опред. эксперимент.), м<sup>3</sup>;  $\Omega$  – отношение  $V/F_\phi$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость воды, Па·с; разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки ( $\Delta P$ , Па);  $R_{\phi n}$  – сопротивление фильтрующей перегородки, м<sup>-1</sup>;  $R_{oc}$  – сопротивление осадка, м<sup>-1</sup>;  $x_o$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от концентрации твердой фазы и структуры осадка;  $r_o$  – удельное сопротивление осадка, м<sup>-2</sup>:

$$r_o = \frac{2K_o \Delta P F_\phi^2}{\mu \cdot x_o}, \quad (2)$$

где  $K_o$  – константа фильтрования, характеризующая сопротивление осадка, с/м<sup>6</sup>.

Сопротивление фильтрующей перегородки ( $R_{\phi n}$ , м<sup>-1</sup>):

$$R_{\phi n} = \frac{K_{\phi n} r_o \cdot x_o}{2K_o F_\phi}, \quad (3)$$

где  $K_{\phi n}$  – константа фильтрования, характеризующая сопротивление фильтрующей перегородки, с/м<sup>3</sup>. Следовательно,

$$r_o = \frac{R_{\phi n} \cdot 2K_o F_\phi}{K_{\phi n} \cdot x_o}. \quad (4)$$

Данное уравнение определяет параметры, влияющие на структуру осадка и протекание процесса фильтрования.

Установлено, что при пуске установки (в первоначальный период) эксплуатации только происходит образование осадка на фильтрующей перегородке и начинает формироваться сопротивление фильтрующей перегородки. Перепад давления ( $\Delta P$ , Па)  $\neq \text{const}$ , следовательно, дифференциальное уравнение, определяющее скорость процесса фильтрования (1), требует уточнения.

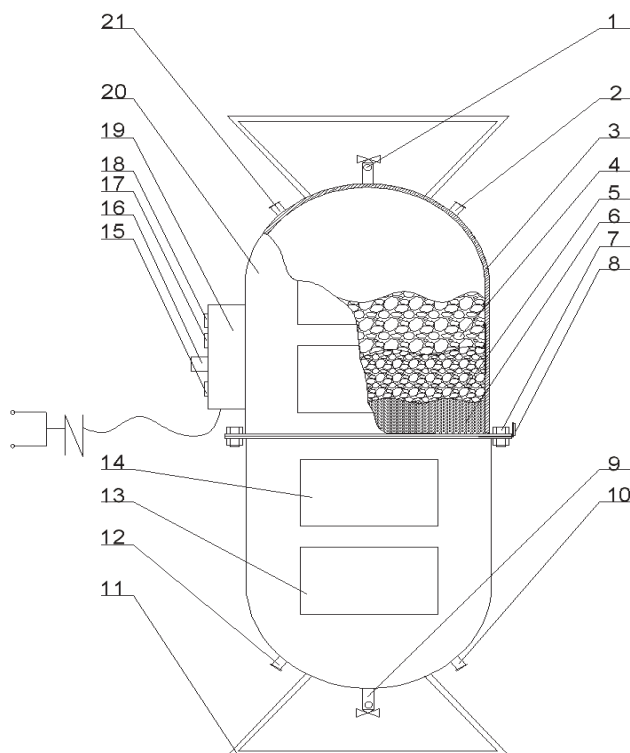


Рис. 2. Принципиальная схема фильтрующей установки: 1 – патрубок подвода очищаемой морской воды; 2 – патрубок отвода промывной воды; 3 – цилиндрический корпус; 4, 5, 6 – слои зернистых фильтрующих материалов на сетчатой разделительной перегородке; 7 – эксцентриковые вибромоторы; 8 – уплотнительная резиновая прокладка; 9 – патрубок отвода фильтрата; 10 – патрубок подвода промывной воды; 11 – подставка; 12 – патрубок подвода воздуха; 13 – нижний резервуар; 14 – смотровые окна из оргстекла с подсветкой; 15 – кнопка одновременного включения питания и подачи воздуха; 16 – кнопка выключения (СТОП); 17 – потенциометр, регулирующий частоту вибрации сетчатой перегородки эксцентриковыми вибромоторами; 18 – кнопка включения освещения в смотровых окнах; 19 – пульт управления со встроенным компрессором и потенциометром; 20 – верхний резервуар; 21 – патрубок отвода воздуха

Fig. 2. Schematic diagram of the filter installation: 1 – supply pipe cleaned seawater; 2 – rinsing water outlet conduit; 3 – a cylindrical body; 4,5,6 – layers of granular filter materials on the mesh partition wall; 7 – eksetrikovye vibro motors; 8 – a sealing rubber pad; 9 – filtrate discharge pipe; 10 - wash water supply pipe; 11 – stand; 12 – air intake pipe; 13 – the bottom tank; 14 - viewing window made of plexiglass with illumination; 15 – button at the same time turn on the power and air supply; 16 - off button (STOP); 17 – potentiometer, which regulates the vibration frequency of the vibrating motor eccentric mesh partitions; 18 – switch button lighting in the viewing window; 19 – remote control with built-in compressor and a potentiometer; 20 – upper reservoir; 21 – exhaust air pipe

Скорость фильтрования в первоначальный период эксплуатации установки ( $v_n$ , м/с), с учетом параметров, характеризующих фильтруемую морскую воду и фильтрующую перегородку, определялась:

$$v_n = \frac{d\Omega_n}{d\tau} = \Psi \cdot n_n \cdot \exp[-\Psi \cdot \varepsilon_1(\chi + \xi) \cdot \tau_s] \quad (5)$$

где  $\Omega_n$  – отношение  $V/F_\phi$  в первоначальный период эксплуатации установки,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;  $\Psi$  – отношение:  $(\Phi \cdot \Delta P)/\mu$ ;  $\Phi$  – параметр, характеризующий фильтрующую перегородку,  $\text{м}^3$  ( $\Phi = 0,375(r_{no}^4/h_{\phi n})$ );  $r_{no}$  – радиус поры осадка, м;  $h_{\phi n}$  – толщина фильтрующей перегородки, м;  $n_n$  – количество капилляров на ед. поверхности фильтрования,  $\text{м}^{-2}$ ;  $\varepsilon_1$  – пористость фильтрующей перегородки;  $\chi, \xi$  – комплекс параметров, характеризующих морскую воду в зави-

симости от количества частиц соответственно с радиусом больше ( $r_{ч1}$ ) и меньше ( $r_{ч2}$ ) радиуса поры ( $r_{но}$ ), плотности тв. частиц ( $\rho_ч$ ) и концентрации морской воды (по массе) –  $C$ ;  $\chi = K_{сб} \cdot F_{сб}$ ,  $\xi = K_{см} \cdot F_{сб} \cdot (r_{ч2}^2 / r_{но})$ ;  $K_{сб}$ ,  $K_{см}$  – количество частиц соответственно с радиусом больше ( $r_{ч1}$ ) и меньше ( $r_{ч2}$ ) радиуса поры ( $r_{но}$ );  $F_{сб}$ ,  $F_{сб1}$  – параметры, характеризующие фильтрующую морскую воду ( $F_{сб1} = C / (4r_{ч1}^3 \rho_ч)$ );  $\rho_ч$  – плотность тв. частиц, кг/м<sup>3</sup>. Уточненное дифференциальное уравнение процесса фильтрации относительно скорости протекания процесса:

$$v = \frac{d\Omega}{d\tau_s} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{фн} + R_{oc} + R_n)} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{фн} + x_o r_o \Omega + R_n)}. \quad (6)$$

Пренебрегая сопротивлением фильтрующей перегородки:

$$v = \frac{d\Omega}{d\tau_s} = \frac{\Delta P}{\mu(R_{oc} + R_n)} = \frac{\Delta P}{\mu(x_o r_o \Omega + R_n)}. \quad (7)$$

Разработана математическая модель (методом Зейделя) [7], описывающая процесс фильтрации морской воды в насыпных зернистых фильтрах (микромодель процесса) относительно минимальной величины расчетного времени фильтрации ( $\tau_p$ , с) и максимальной удельной производительности однослойных и двухслойных насыпных фильтров ( $V_f$ , м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>), с последующим составлением программ по расчету на ЭВМ (табл. 3).

При разработке математической модели учитывались следующие основные параметры: входные значения, полученные экспериментальным путем (высота водяного столба, объем воды, средний размер частиц фильтрующей загрузки (по диаметру) и др.); управляющие значения, поддающиеся изменениям в соответствии с теми или иными технологическими требованиями (поверхности фильтрации, высота слоя фильтрующей загрузки и т.п.); характеристики состояния, определяющие режим процесса фильтрации (общее количество и объем образованного осадка); возмущаемые величины, изменяющиеся случайным образом и оказывающие существенное воздействие на процесс в целом (падение давления, срыв зерен и примесей в фильтрат и др.).

Таблица 3

**Математическая модель решения оптимизационной задачи в технологической линии подготовки морской воды, по расчету насыпных фильтров**

Table 3

**A mathematical model for solving the optimization problem in the production line preparation of the sea water, for the calculation of bulk filters**

№ п/п	Расчетная формула	Единицы	Фильтруемая вода	Пределы измерений			
				Стеклопанельная модель		Полупромышленная установка	
				Однослойный фильтр	Двухслойный фильтр	Однослойный фильтр	Двухслойный фильтр
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Разность давлений по обе стороны фильтровальной перегородки: $\Delta P = P_1 - P_2$ , где $P_1$ , $P_2$ – давление жидкости над и под фильтрующей перегородкой, Па: $\Delta P = h_g \cdot 9,81$ , $h_g$ – высота водяного столба (опред. экспериментально) <sup>1</sup> , мм вод. ст.	Па	дистил.  пресная  морская	931,95 ÷ 3727,80		7357,50 ÷ 14715,00	

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
2	$\mu$ – динамическая вязкость воды, при температуре $t_e = 0 \div 30$ °С	Па·с	дистил.	$(0,789 \div 1,581) \cdot 10^{-3}$		$(0,789 \div 1,581) \cdot 10^{-3}$	
	пре- сная		$(0,801 \div 1,792) \cdot 10^{-3}$		$(0,801 \div 1,792) \cdot 10^{-3}$		
	мор- ская		$(1,372 \div 1,945) \cdot 10^{-3}$		$(1,372 \div 1,945) \cdot 10^{-3}$		
3	Коэффициент пропорц., зависящий от концентрации тв. фазы и структуры осадка: $x_0 = \frac{V_0}{V},$ где $V_0$ – объем образ. осадка, м <sup>3</sup> ; $V$ – объем фильтрата (опред. эксперимент.), м <sup>3</sup>	-	дистил.	$1,16 \cdot 10^{-6} \div 2,34 \cdot 10^{-4}$	$(6,79 \div 15,45) \cdot 10^{-5}$	$(1,98 \div 4,11) \cdot 10^{-8}$	$(5,08 \div 5,56) \cdot 10^{-8}$
	пре- сная		$(1,87 \div 73,44) \cdot 10^{-5}$	$(9,98 \div 91,98) \cdot 10^{-5}$	$8,43 \cdot 10^{-8} \div 1,40 \cdot 10^{-7}$	$(1,48 \div 1,81) \cdot 10^{-7}$	
	мор- ская		$(2,50 \div 86,72) \cdot 10^{-5}$	$(10,27 \div 98,3) \cdot 10^{-5}$	$(1,16 \div 1,59) \cdot 10^{-7}$	$(1,59 \div 1,95) \cdot 10^{-7}$	
4	Объем образ. осадка: $V_0 = \frac{m_0 \cdot K_3 / \rho_{\phi.з}}{1 - \varphi},$ где $m_0$ – общее кол-во образ. осадка, кг; $K_3$ – коэфф. запаса <sup>3</sup> ; $\rho_{\phi.з}$ – плотность всех слоев фильт. загрузки, кг/м <sup>3</sup> ; $\varphi$ – влажность осадка <sup>6</sup> , %	м <sup>3</sup>	дистил.	$2,89 \cdot 10^{-10} \div 2,34 \cdot 10^{-7}$	$1,70 \cdot 10^{-8} \div 1,55 \cdot 10^{-7}$	$9,91 \cdot 10^{-9} \div 2,07 \cdot 10^{-6}$	$2,54 \cdot 10^{-8} \div 2,80 \cdot 10^{-6}$
	пре- сная		$4,68 \cdot 10^{-9} \div 7,34 \cdot 10^{-7}$	$2,49 \cdot 10^{-8} \div 9,20 \cdot 10^{-7}$	$4,22 \cdot 10^{-8} \div 7,04 \cdot 10^{-6}$	$7,39 \cdot 10^{-8} \div 9,11 \cdot 10^{-7}$	
	мор- ская		$6,25 \cdot 10^{-9} \div 8,67 \cdot 10^{-7}$	$2,57 \cdot 10^{-8} \div 9,83 \cdot 10^{-7}$	$5,80 \cdot 10^{-8} \div 8,00 \cdot 10^{-6}$	$7,97 \cdot 10^{-8} \div 9,81 \cdot 10^{-7}$	
5	Общее количество осадка, образованного в процессе фильтрования: $m_0 = m_2 - m_1 - \Delta m,$ где $m_1, m_2$ – соответственно $\Sigma$ масса всех слоев фильт. загрузки до и после фильтрования, кг; $\Delta m$ – погрешность измер. прибора <sup>4</sup> , кг	кг	дистил.	$(5,00 \div 30,00) \cdot 10^{-5}$	$(2,20 \div 39,20) \cdot 10^{-4}$	$(16,90 \div 27,9) \cdot 10^{-4}$	$(5,80 \div 7,99) \cdot 10^{-3}$
	пре- сная		$(8,10 \div 9,40) \cdot 10^{-4}$	$(1,31 \div 5,76) \cdot 10^{-3}$	$(71,90 \div 94,9) \cdot 10^{-4}$	$(1,69 \div 2,60) \cdot 10^{-2}$	
	мор- ская		$(10,80 \div 11,1) \cdot 10^{-4}$	$(1,40 \div 5,93) \cdot 10^{-3}$	$(98,90 \div 107,9) \cdot 10^{-4}$	$(1,82 \div 2,80) \cdot 10^{-2}$	
6	$m_1$ – масса фильт. загрузки до процесса фильтрования (опред. экспериментально)	кг	дистил.	$(13,03 \div 103,7) \cdot 10^{-3}$	$(22,30 \div 206,5) \cdot 10^{-3}$	$12,85 \cdot 10^{-2} \div 3,12$	$22,05 \cdot 10^{-2} \div 6,20$
	пре- сная						
	мор- ская						
7	$m_2$ – масса фильтрующей загрузки после процесса фильтрования (опред. экспериментально)	кг	дистил.	$(13,09 \div 104,0) \cdot 10^{-3}$	$(26,23 \div 206,7) \cdot 10^{-3}$	$13,02 \cdot 10^{-2} \div 3,12$	$22,63 \cdot 10^{-2} \div 6,21$
	пре- сная		$(13,85 \div 104,6) \cdot 10^{-3}$	$(28,07 \div 207,8) \cdot 10^{-3}$	$13,57 \cdot 10^{-2} \div 3,13$	$23,74 \cdot 10^{-2} \div 6,23$	
	мор- ская		$(14,12 \div 104,8) \cdot 10^{-3}$	$(28,24 \div 207,9) \cdot 10^{-3}$	$13,84 \cdot 10^{-2} \div 3,13$	$23,87 \cdot 10^{-2} \div 6,23$	
8	Плотность всех слоев фильтрующей загрузки: $\rho_{\phi.з} = \frac{m_1}{V_{\phi.з}},$ где $V_{\phi.з}$ – общий объем всех слоев загрузки, м <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	дистил.	$(6,14 \div 829,94) \cdot 10^3$	$(6,84 \div 1108,6) \cdot 10^3$	$(6,47 \div 818,47) \cdot 10^3$	$(13,7 \div 1096,3) \cdot 10^3$
	пре- сная						
	мор- ская						

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
9	Общий объем всех слоев фильтрующей загрузки: $V_{\phi.z.} = \left( \frac{\pi \cdot d_{q1}^2 \cdot h_c}{4 \cdot 2} \right) + \left( \frac{\pi \cdot d_{q2}^2 \cdot h_c}{4 \cdot 2} \right)$ где $d_{q1}, d_{q2}$ – средний размер частиц 1–2-го слоя загрузки, м; $h_c$ – $\Sigma$ высота всех слоев фильтрующей загрузки, м	м <sup>3</sup>	дис-тил. пре-сная мор-ская	$1,57 \cdot 10^{-8} \div 1,69 \cdot 10^{-5}$	$2,01 \cdot 10^{-8} \div 3,02 \cdot 10^{-5}$	$1,57 \cdot 10^{-7} \div 4,82 \cdot 10^{-4}$	$2,01 \cdot 10^{-7} \div 4,53 \cdot 10^{-4}$
10	$h_c$ – высота всех слоев фильтрующей загрузки (опред. экспериментально)	м	дис-тил. пре-сная мор-ская	$(2 \div 2,1) \cdot 10^{-2}$	$(2 \div 2,5) \cdot 10^{-2}$	$(20 \div 60) \cdot 10^{-2}$	
11	Удельное сопротив. осадка: $r_0 = \frac{\Delta P}{\mu \cdot h_0 \cdot v}$ где $h_0$ – высота слоя осадка, м; $v$ – скорость фильтрования, м/с	м <sup>2</sup>	дис-тил. пре-сная мор-ская	$1,88 \cdot 10^{12} \div 7,03 \cdot 10^{14}$ $5,35 \cdot 10^{11} \div 4,40 \cdot 10^{13}$ $4,24 \cdot 10^{11} \div 1,94 \cdot 10^{13}$	$5,57 \cdot 10^{12} \div 2,69 \cdot 10^{13}$ $8,43 \cdot 10^{11} \div 1,82 \cdot 10^{13}$ $7,31 \cdot 10^{11} \div 1,03 \cdot 10^{13}$	$1,43 \cdot 10^{12} \div 2,21 \cdot 10^{15}$ $3,71 \cdot 10^{11} \div 5,35 \cdot 10^{14}$ $3,01 \cdot 10^{11} \div 2,31 \cdot 10^{14}$	$2,06 \cdot 10^{12} \div 1,20 \cdot 10^{15}$ $5,59 \cdot 10^{11} \div 6,86 \cdot 10^{14}$ $4,78 \cdot 10^{11} \div 3,72 \cdot 10^{14}$
12	Высота слоя осадка: $h_0 = \frac{x_0 \cdot V}{F_\phi}$ где $F_\phi$ – поверхность фильтрования (опред. экспериментально) <sup>7</sup> , м <sup>2</sup>	м	дис-тил. пре-сная мор-ская	$1,22 \cdot 10^{-7} \div 9,87 \cdot 10^{-5}$ $1,97 \cdot 10^{-6} \div 3,09 \cdot 10^{-4}$ $2,63 \cdot 10^{-6} \div 3,65 \cdot 10^{-4}$	$7,15 \cdot 10^{-6} \div 6,51 \cdot 10^{-5}$ $1,05 \cdot 10^{-5} \div 3,87 \cdot 10^{-4}$ $1,08 \cdot 10^{-5} \div 4,14 \cdot 10^{-4}$	$7,89 \cdot 10^{-8} \div 1,65 \cdot 10^{-5}$ $3,36 \cdot 10^{-7} \div 5,60 \cdot 10^{-5}$ $4,62 \cdot 10^{-7} \div 6,37 \cdot 10^{-5}$	$2,02 \cdot 10^{-7} \div 2,23 \cdot 10^{-5}$ $5,88 \cdot 10^{-7} \div 7,25 \cdot 10^{-5}$ $6,34 \cdot 10^{-7} \div 7,81 \cdot 10^{-5}$
13	$\tau_s$ – время работы фильтра до остановки (опред. экспериментально)	с	дис-тил. пре-сная мор-ская	$7,63 \div 33,21$ $7,85 \div 33,47$ $7,91 \div 33,99$	$17,12 \div 65,92$ $17,27 \div 66,14$ $17,34 \div 66,48$	$74,43 \div 1015,72$ $77,91 \div 1016,25$ $79,27 \div 1016,99$	$172,17 \div 1979$ $174,93 \div 1981$ $175,13 \div 1981,67$
14	Скорость фильтрования: $v = \frac{V}{F_\phi \cdot \tau_s}$	м/с	дис-тил. пре-сная мор-ская	$(1,27 \div 1,38) \cdot 10^{-2}$ $(1,26 \div 1,34) \cdot 10^{-2}$ $(1,24 \div 1,33) \cdot 10^{-2}$	$(6,15 \div 6,39) \cdot 10^{-3}$ $(6,09 \div 6,37) \cdot 10^{-3}$ $(6,07 \div 6,33) \cdot 10^{-3}$	$(5,35 \div 39,51) \cdot 10^{-2}$ $(5,11 \div 39,49) \cdot 10^{-2}$ $(5,02 \div 39,46) \cdot 10^{-2}$	$(23,1 \div 202,8) \cdot 10^{-3}$ $(22,8 \div 202,6) \cdot 10^{-3}$ $(22,7 \div 202,5) \cdot 10^{-3}$
15	Время работы фильтра до остановки (расчетное): $\tau_p = \frac{\mu \cdot x_0 \cdot r_0}{\Delta P} \cdot \left( \frac{V}{F_\phi} \right)^2$	с	дис-тил. пре-сная мор-ская	$7,63 \div 33,21$ $7,85 \div 33,47$ $7,91 \div 33,99$	$17,12 \div 65,92$ $17,27 \div 66,14$ $17,34 \div 66,48$	$74,43 \div 1015,72$ $77,91 \div 1016,25$ $79,27 \div 1016,99$	$172,17 \div 1979$ $174,93 \div 1981$ $175,13 \div 1981,67$
16	Удельная производительность фильтра, пренебрегая сопротивлением фильтровальной перегородки ( $R_{\phi.n}$ ): $V_f = \sqrt{\left( \frac{\Delta P}{\mu \cdot x_0 \cdot r_0} \cdot \tau_\delta \right)}$	м <sup>3</sup> /м <sup>2</sup>	дис-тил. пре-сная мор-ская	$(105,3 \div 421,1) \cdot 10^{-3}$	$(105,3 \div 421,1) \cdot 10^{-3}$	$3,98 \div 401,27$	$3,98 \div 401,27$

Примечание. <sup>1</sup> $h_0$  – высота водяного столба, мм вод. ст.: ст. модель = 95÷380, полупром. установка=750÷1500; <sup>2</sup> $V$  – объем фильтрата, м<sup>3</sup> (ст. модель=2,5·10<sup>-4</sup>÷1,00·10<sup>-3</sup>, полупром. установка=0,5÷50,4); <sup>3</sup> $K_z$  – коэффициент запаса: 1,2; <sup>4</sup> $\Delta m$  – погрешность измерительного прибора, кг: ±1·10<sup>-5</sup>; <sup>5</sup> $d_q$  – средний



размер частиц фильтрующей загрузки, по диаметру, м:  $(0,1 \div 3,2) \cdot 10^{-2}$ ;  ${}^6\varphi$  – влажность осадка, %: 75;  ${}^7d_{п.ф}$  – диаметр поверхности фильтрования, м: ст. модель =  $5,5 \cdot 10^{-2}$ , полупром. установка =  $40 \cdot 10^{-2}$ ;  ${}^8F_{\phi} = (\pi \cdot d_{п.ф}^2) / 4$ , м<sup>2</sup>: ст. модель =  $2,37 \cdot 10^{-3}$ , полупром. установка =  $12,56 \cdot 10^{-2}$ .

S – соленость воды, ‰: дистиллированная вода (S → 0,0 ‰), пресная вода (S < 0,5 ‰), морская вода (S = 26,78 ÷ 34‰).

### Выводы

В результате получили следующие оптимальные параметры работы насыпных фильтров, при которых обеспечивается максимальная производительность при минимальной продолжительности процесса фильтрования (не происходит срыв зерен в фильтрат) [9]: для однослойного фильтра (стеклянная модель) – минимальная величина времени фильтрования ( $\tau_p$ ) = 7,91 с, максимальная удельная производительность ( $V_f$ ) =  $105,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>; для однослойного фильтра (полупромышленная установка) – минимальная величина времени фильтрования ( $\tau_p$ ) = 79,27 с, максимальная удельная производительность ( $V_f$ ) =  $3,98$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>; для двухслойного фильтра (стеклянная модель) – минимальная величина времени фильтрования ( $\tau_p$ ) = 17,34 с, максимальная удельная производительность ( $V_f$ ) =  $105,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>; для двухслойного фильтра (полупромышленная установка) – минимальная величина времени фильтрования ( $\tau_p$ ) = 175,13 с, максимальная удельная производительность ( $V_f$ ) =  $3,98$  м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>.

Произведена проверка адекватности полученной математической модели. Данные, полученные в процессе эксплуатации полупромышленной установки, отличались от предсказанных в математической модели в среднем не более чем на 4,87 %. Следовательно, разработанная математическая модель является адекватной и может быть использована при прогнозировании удельной производительности фильтрования в зависимости от изменяемых параметров.

### Список литературы

1. Варжапетян, А.Г. Автоматизация контроля параметров водной среды / А.Г. Варжапетян, Г.И. Коршунов, М.А. Надеяевы. – Л.: Судостроение, 1988. – 232 с.
2. ГОСТ Р ИСО 5667.2-93. Качество воды. Отбор проб. Руководство по методам отбора проб. – М.: Госстандарт РФ, 1993. – 29 с.
3. ГОСТ 17.1.3.08-82. Охрана природы. Гидросфера. Правила контроля качества морских вод. – М.: Госстандарт РФ, 1982. – 6 с.
4. ГОСТ Р 51592-2000. Вода. Общие требования к отбору проб. – М.: Госстандарт РФ, 2000. – 19 с.
5. ГОСТ 17.1.3.07-99. Охрана природы. Правила контроля качества воды в водоемах и водотоках. – М.: Госстандарт РФ, 1999. – 21 с.
6. Крикун, А.И. Математическое моделирование процесса фильтрования / А.И. Крикун, С.Д. Угрюмова // Науч. жизнь (ВАК). – 2016. – № 12. – С. 6–14.
7. Панфилов, В.А. Технологические линии пищевых производств (теория технологического потока) / В.А. Панфилов. – М.: Колос, 1993. – 288 с.
8. Плюта, А.И. Об одном варианте метода Зейделя / А.И. Плюта // Математическое моделирование. – 2003. – Т. 15, № 12. – С. 79–85.
9. Угрюмова, С.Д. Операторная модель управления как показатель надежности технологических систем в пищевых производствах / С.Д. Угрюмова, А.И. Крикун, И.В. Панюкова // Фундаментальные и прикладные вопросы естествознания. – Владивосток: ТОВМИ им. С.О. Макарова ВУНЦ «ВМА», 2012. – Т. 3. – С. 213–216.
10. Угрюмова, С.Д. Исследование факторов, определяющих эффективную производительность фильтров / С.Д. Угрюмова, А.И. Крикун // Приморские Зори. – Владивосток: МАНЭБ, 2015. – С. 131–135.

**Сведения об авторах:** Крикун Александра Игоревна, старший преподаватель, e-mail: aleksa13@list.ru;

Угрюмова Светлана Дмитриевна, доктор технических наук, профессор, e-mail: ms.s.d.u@mail.ru.