

## Список літератури

1. Заграй Я. М. Використання природних мінералів (шунгіту) як етапів комплексної технології корегування складу водних розбавлених розчинів до природно сформованої якості // Екологічна безпека та природокористування, 2014 № 15. С. 124-129.

2. Шандрович В. Т. Підвищення рівня екологічної безпеки шляхом удосконалення роботи міських очисних споруд: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 21.06.01 – екологічна безпека // Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2015. 178 с.

3. Петрушка І. М. Очищення стічних вод від барвників природними сорбентами // Вісник Національного університету «Львівська політехніка», 2003. № 488: Хімія, технологія речовин та їх застосування. С. 230-233.

4. Шевцова Л. В. Стічні води підприємств готельно-ресторанного комплексу як потенційна загроза біорізноманіттю водних екосистем // Вісник Дніпропетровського державного аграрного університету, 2014. № 1. С. 102-105.

5. Ткач Г. М. Використання шунгітів у сучасних технологіях // Матеріали ХІХ наукової конференції ТНТУ ім. Ів. Пулюя, 18-19 травня 2016 року — Т.: ТНТУ, 2016. С. 202-204.

Надійшло до редакції 22.11.2016

УДК 628.16

С.М. ЭПОЯН, доктор технических наук  
А.С. КАРАГЯУР, доктор технических наук  
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры  
В.Н. ВОЛКОВ  
Коммунальное предприятие «Харьководоканал»

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ДРЕНАЖНЫХ СИСТЕМ СКОРЫХ ФИЛЬТРОВ ДЛЯ ДООЧИСТКИ

*Представлені результати теоретичних досліджень процесу послідовного фільтрування малоконцентрованої суспензії через шар фільтруючого зернистого завантаження та пористу перегородку з волокнистих полімерних матеріалів. Розглянуто фільтрування з поступовим закупорюванням пор пористої перегородки.*

**Ключові слова:** зернисте фільтруюче завантаження, завислі речовини, дренажна система, волокнисті полімерні матеріали, математична модель.

© Епоян С.М., Карагяур А.С.,  
Волков В.М., 2016

*Представлены результаты теоретических исследований процесса последовательного фильтрования малоконцентрированной суспензии через слой фильтрующей зернистой загрузки и пористую перегородку из волокнистых полимерных материалов. Рассмотрено фильтрование с постепенным закупориванием пор пористой перегородки.*

**Ключевые слова:** зернистая фильтрующая загрузка, взвешенные вещества, дренажная система, волокнистые полимерные материалы, математическая модель.

*The results of theoretical studies of the process of consistent filtration of low-concentration suspension through a layer of granular filtering media and a porous membrane of fibrous polymeric materials are presented. Filtration with a gradual pore plugging of the porous membrane is considered.*

**Keywords:** granular filtering media, suspended solids, drainage system, fibrous polymeric materials, mathematical model

Эксплуатация фильтровальных сооружений является самой затратной частью в технологии водоподготовки [1, 3]. Это связано с необходимостью периодической регенерации фильтрующей загрузки, которая осуществляется путем водяной или водо-воздушной промывки.

Одним из путей снижения данных эксплуатационных затрат является увеличение времени работы сооружения в режиме фильтрования. На станциях водоподготовки широкое распространение получили фильтры с зернистой загрузкой. Для этих сооружений самым простым решением повышения грязеемкости является применение зернистых материалов с высокой пористостью и более устойчивых к истиранию (цеолит, шунгизит и т.д.) [2, 57]. В результате истирания повышается полидисперсность загрузки и снижается пористость: более мелкие частицы располагаются между крупными.

Критерием отключения фильтра на промывку может быть или снижение качества фильтрата ниже допустимого уровня («проскок» загрязнений), или достижение потерь напора предельных значений в результате роста закольматированности загрузки. Параметры фильтрующей загрузки считаются подобранными рационально, если продолжительности работы фильтра по этим двум критериям приблизительно одинаковы  $T_{\text{ф}} \approx T_{\text{н}}$ .

При применении однослойных фильтров обычно кольматируются слои первые по направлению фильтрования, и потери напора быстро достигают предельных значений. Фильтр отключается на промывку, причем промываются и нижние незагрязненные слои. Для более равномерного распределения загрязнений по высоте фильтрующей загрузки применяются двухслойные фильтры [3, 80]. В этом случае материал загрузки первого слоя должен иметь плотность меньшую, чем материал второго слоя. Это необходимо для предотвращения перемешивания слоев при промывке. С учетом этого условия широкое распространение получили антрацитокварцевые фильтры [4, 242]. Это условие, а также требования по

устойчивости к истиранию, и то, что существующие материалы, применяемые в качестве зернистой загрузки, имеют конкретные параметры, которые не всегда соответствуют рациональным значениям при совместном применении, ограничивают эффективность данного решения.

Более перспективными устройствами, которые можно применить для доочистки, являются аппараты микрофильтрации, а именно фильтры, выполненные из пористых волокнистых полимерных материалов. В [5, 8] показано, что фильтры из волокнисто-пористого полиэтилена по качеству осветления малоцентрированной тонкодисперсной суспензии не уступают фильтрам с песчаной загрузкой или загрузкой из пенополистирола.

Для упрощения конструкции фильтровального сооружения и уменьшения количества основных элементов предлагается в качестве устройств доочистки использовать дренажные системы, выполненные из пористых волокнистых полимерных материалов [6, 152].

Такие дренажные системы позволяют не только равномерно распределять промывную воду и отсекают частицы зернистой загрузки, но и задерживать частицы взвеси, поступающие вместе с фильтратом. В отличие от зернистой загрузки пористые волокнистые полимерные материалы при небольших размерах ячеек имеют значительную пористость. Возможно их изготовление в широком диапазоне размеров пор, в том числе с переменным значением по толщине полимерной оболочки. Значительная пористость обуславливает невысокие значения потерь напора, позволяет накапливать часть загрязнений. При промывке исключается вынос полимерных волокнистых частиц из материала дренажной системы и их перемешивание с частицами зернистой загрузки. Для зернистой загрузки при такой схеме возможно применение материалов с бóльшим размером зерен, что способствует более равномерному распределению загрязнений по высоте зернистой загрузки и повышению эффективности работы сооружения.

В [7, 102] представлены результаты теоретических исследований по последовательному фильтрованию воды через слой зернистой загрузки и пористую перегородку с образованием над перегородкой слоя осадка, которые подтвердили эффективность применения пористых дренажных систем для доочистки.

Дальнейшее обоснование эффективности данного решения проведем с помощью математического моделирования. Рассмотрим случай, когда сопротивление пористой оболочки дренажной системы изменяется в результате постепенного закупоривания пор.

Для упрощения математической модели примем следующие допущения и предположения.

1. Дренажная система представляет собой плоскую горизонтальную пористую перегородку, через которую равномерно фильтруется очищаемая вода. Такой подход позволяет моделировать процесс с помощью одномерных уравнений, записанных в прямоугольной системе координат.

2. В течение времени фильтрующая способность дренажной системы изменяется только в результате постепенного закупоривания ее пор частицами взвеси.

3. Течение очищаемой жидкости через слой фильтрующей загрузки и пористую перегородку происходит в ламинарном режиме.

4. Вклад диффузии в перенос взвешенных веществ при фильтрации в неподвижном слое зернистой загрузки и пористой оболочке дренажной системы мал в сравнении с другими составляющими.

5. Кинетика изменения концентрации взвешенных веществ в фильтрующей загрузке и пористой перегородке описывается линейной зависимостью.

6. При прохождении слоя зернистой загрузки равновероятно задерживаются все частицы взвеси независимо от размера, поэтому можно принять распределение частиц взвеси по размерам в воде, поступающей на пористую перегородку, таким же, как и в исходной.

Основу математической модели составляет уравнение фильтрации, записанное в виде [8, 27]:

$$\frac{1}{F} \frac{dW(t)}{dt} = \frac{\Delta p(t)}{\mu(R_{3.3.}(t) + R_{п.п.}(t))}, \quad (1)$$

где  $W(t)$  – объем очищенной воды,  $m^3$ ;  $F$  – площадь поверхности фильтрации,  $m^2$ ;  $\Delta p(t)$  – разность давлений (напора), Па;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $R_{3.3.}(t)$  – сопротивление слоя зернистой загрузки  $m^{-1}$ ;  $R_{п.п.}(t)$  – сопротивление пористой перегородки,  $m^{-1}$ ;  $t$  – время, с.

Сопротивление слоя зернистой загрузки  $R_{3.3.}$ , которое изменяется в результате кольматации, равно

$$R_{3.3.}(t) = h_{3.3.} \bar{r}_{3.3.}(t), \quad (2)$$

где  $\bar{r}_{3.3.}(t) = \frac{1}{h_{3.3.}} \int_0^{h_{3.3.}} r(z,t) dz$  – среднее удельное сопротивление слоя зернистой загрузки,  $m^{-2}$ ;  $z$  – координата, м, которая изменяется в диапазоне от 0 до  $h_{3.3.}$

Удельное сопротивление слоя зернистой загрузки можно оценить с помощью уравнения Козени-Кармана [8, 144]:

$$r(z,t) = k_1 \cdot F_{уд}^2 \cdot \frac{(1 - n_{3.3.}(z,t))^2}{n_{3.3.}^3(z,t)}, \quad (3)$$

где  $n_{3.3.}(z, t)$  – пористость зернистой загрузки;  $F_{уд} = \frac{6(1-\varepsilon)}{\Phi d_{3.3.}}$  – удельная поверхность зерен,  $m^{-1}$ ;  $\varepsilon$  – порозность слоя;  $\Phi$  – коэффициент формы, для шарообразных частиц  $\Phi = 1$ ;  $k_1$  – отношение длины пор к размерам зерна;  $d_{3.3.}$  – эквивалентный диаметр зерен загрузки, м.

Изменение пористости зернистой загрузки в результате кольматации определим с помощью зависимости

$$n_{3.3.}(z,t) = n_{03.3.} - \frac{S(z,t)}{\gamma}, \quad (4)$$

где  $n_{0з.з.}$  – пористость незакольтмированной зернистой загрузки;  $\gamma$  – концентрация твердых частиц взвеси в осадке, кг/м<sup>3</sup>;  $S(z, t)$  – концентрация частиц взвеси, задержанных на зернах фильтрующей загрузки, кг/м<sup>3</sup>;

а также следующей системы уравнений:

– уравнения переноса взвешенных частиц взвеси потоком фильтрующейся жидкости:

$$n_{з.з.}(z,t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial t} + V(t) \frac{\partial C(z,t)}{\partial z} + \frac{\partial S(z,t)}{\partial t} = 0; \quad (5)$$

– уравнения массопередачи частиц взвеси из воды в твердую фазу зернистой загрузки

$$\frac{\partial S(z,t)}{\partial t} = b(t)C(z,t) - a(t)S(z,t), \quad (6)$$

где  $C(z, t)$  – концентрация частиц взвеси в фильтрующейся жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$V(t) = \frac{1}{F} \frac{dW(t)}{dt}$  – скорость фильтрования, м/с;  $a(t)$  и  $b(t)$  – коэффициенты,

соответственно, отрыва и прилипания частиц взвеси к зернам загрузки, с<sup>-1</sup>.

Коэффициенты  $a(t)$  и  $b(t)$  определяются по зависимостям:

$$a(t) = \frac{V(t)}{d_{з.з.}} \alpha; \dots b(t) = \frac{\beta}{(V(t))^{0,7} d_{з.з.}^{1,7}} V(t), \quad (7)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, учитывающие физико-химические свойства зерен загрузки и фильтрующейся через нее суспензии.

Для описания изменения сопротивления пористой перегородки в результате постепенного закупоривания пор  $R_{п.п.}$  можно воспользоваться системой уравнений (2)-(7), в которую следует подставлять размеры пор  $d_p$ , начальную пористость  $n_{0п.п.}$  и толщину  $h_{п.п.}$  пористой перегородки. Также другими будут коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$ . Для пористой перегородки исходной концентрацией взвешенных веществ будет их содержание в воде, прошедшей очистку в слое зернистой загрузки.

Система уравнений и зависимостей (1)–(7) решается численно методом конечных разностей.

При численной реализации разработанной математической модели принимаются следующие начальные и граничные условия:

– *начальные условия*:

при  $t = 0$   $C(z) = C_{ф}$  (мутность фильтрата);  $S(z) = 0$ ; если поддерживается

постоянный напор  $\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho g} = const$ , начальная производительность фильтра

равна  $Q_0 = \frac{\Delta p}{\frac{\mu}{F} (R_{0з.з.} + R_{0п.п.})}$ ,

где  $R_{0з.з.}$  – сопротивление слоя незакольтмированной загрузки;  $R_{0п.п.}$  – сопротивление незакольтмированной пористой перегородки;

в случае, когда поддерживается режим  $Q(t) = \frac{dW(t)}{dt} = const$ , потери напора в начале фильтроцикла равны  $\Delta H_0 = \frac{\Delta p_0}{\rho g} = \frac{Q}{\rho g} \frac{\mu}{F} (R_{03.3.} + R_{0пн.п.})$ ;

– *граничные условия:*

при  $z = 0$   $C = C_0$ ,  $S$  определяется из уравнения (6):

$$S(0,t) = \frac{b(t)C_0}{a(t)} (1 - e^{-at}).$$

В этом случае конечно-разностные аналоги основных уравнений и зависимостей математической модели для зернистой загрузки имеют вид

$$Q_k = a_1 \frac{\Delta p}{(R_{3.3.})_k + (R_{п.п.})_k} \text{ или } \Delta p_k = \frac{Q}{a_1} ((R_{3.3.})_k + (R_{п.п.})_k);$$

$$V_k = \frac{Q_k}{F}; \quad W_k = W_{k-1} + Q_k \Delta t;$$

$$a_k = V_k \frac{\alpha}{d_{3.3.}}; \quad b_k = V_k^{0,3} \frac{\beta}{d_{3.3.}^{1,7}}; \quad S_{i,k} = \frac{b_k \cdot C_{i,k} \Delta t + S_{i,k-1}}{1 + a_k \Delta t};$$

$$C_{i,k} = \frac{-\frac{S_{i,k} - S_{i-1,k-1}}{\Delta t} + C_{i-1,k} \frac{V_k}{\Delta z} + (n_{3.3.})_{i,k} \frac{C_{i-1,k-1}}{\Delta t}}{\frac{V_k}{\Delta z} + \frac{(n_{3.3.})_{i,k}}{\Delta t}};$$

$$(n_{3.3.})_{i,k} = n_{033.3} - \frac{S_{i,k}}{\gamma}; \quad (r_{3.3.})_{i,k} = a_2 \frac{(1 - (n_{3.3.})_{i,k})^2}{(n_{3.3.})_{i,k}^3};$$

$$(\bar{r}_{3.3.})_k = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (r_{3.3.})_{i,k}; \quad (R_{3.3.})_k = h_{3.3.} (\bar{r}_{3.3.})_k;$$

где  $a_1 = \frac{F}{\mu}$ ;  $a_2 = k_1 F_{уд}^2$ ;  $i, k$  – номер шага, соответственно, по координате  $z$  и времени,  $\Delta z, \Delta t$  – величина шага соответственно, по координате  $z$  и времени;  $m$  – количество узлов по вертикальной координате  $z$ .

Для пористой перегородки конечно-разностные уравнения и порядок их расчета будут аналогичными.

На каждом шаге по времени  $k$  данная система уравнений решается в представленной последовательности методом итераций, пока  $\left| \frac{W'' - W'}{W'} \right| \geq 0,05$ , где  $W'$  и  $W''$  – значения параметра  $W$ , соответственно, на предыдущем и последующем шагах итерации. На первом шаге итерации в момент времени  $k$  значения параметров  $R_{3.3.}$ ,  $R_{п.п.}$ ,  $n$  и  $C$  принимаются равными значениям на предыдущем шаге по времени  $k - 1$ .

С помощью разработанной математической модели последовательного фильтрования воды через слой зернистой загрузки и

пористую перегородку изучена эффективность применения дренажных систем для доочистки.

Рассмотрим случай, когда поддерживается режим постоянной производительности  $Q(t) = \frac{dW(t)}{dt} = const$ . В качестве критерия эффективности выбрана величина, представляющая собой отношение продолжительности работы без промывки фильтра с дренажной системой, используемой для доочистки,  $T_2$  к такому же параметру для фильтра традиционной конструкции  $T_1$ . Для повышения объективности сравнения параметры зернистой загрузки фильтра традиционной конструкции подобраны таким образом, что  $T_{\phi} \approx T_{н}$ .

На рис. 1 представлены примеры расчета влияния на эффективность доочистки дренажной системой эквивалентного диаметра зерен загрузки и толщины пористой перегородки  $h_{п.п.}$ . Принималось соотношение эквивалентных диаметров зерен загрузки в фильтре с дренажной системой и обычной конструкции  $d_{23.3.}/d_{13.3.}$

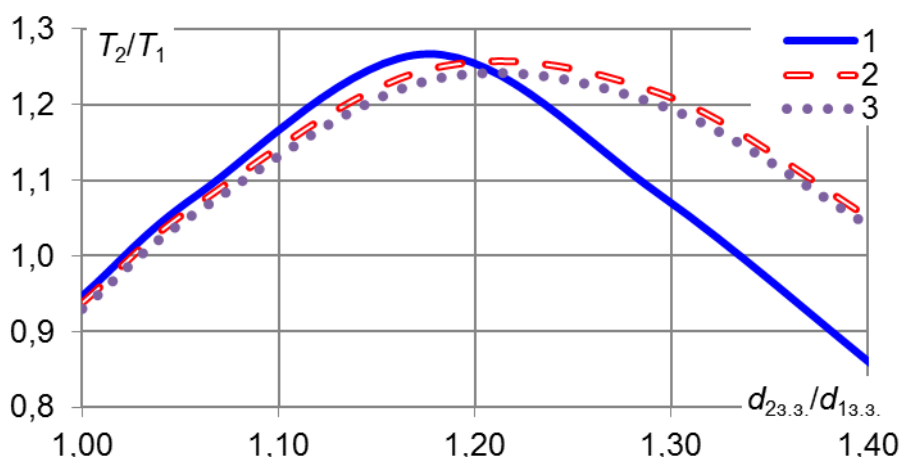


Рис. 1. Зависимость параметра  $T_2/T_1$  от эквивалентного диаметра зерен загрузки и рейтинга фильтрации: 1 –  $1h_{п.п.}$ ; 2 –  $1,25 h_{п.п.}$ ; 3 –  $1,5 h_{п.п.}$ .

На рис. 2 представлены примеры расчета влияния на эффективность доочистки дренажной системой эквивалентного диаметра зерен загрузки и размеров пор пористой перегородки.

Для примеров расчетов, представленных на рис. 1 и 2, принималось, что промывка осуществляется, если или происходит «проскок» загрязнений – концентрация взвешенных частиц в фильтрате превышает 10% от исходной

$$\frac{C_{\phi}}{C_0} > 0,1 \text{ или потери напора } \frac{\Delta p}{\rho g} > 3 \text{ м.}$$

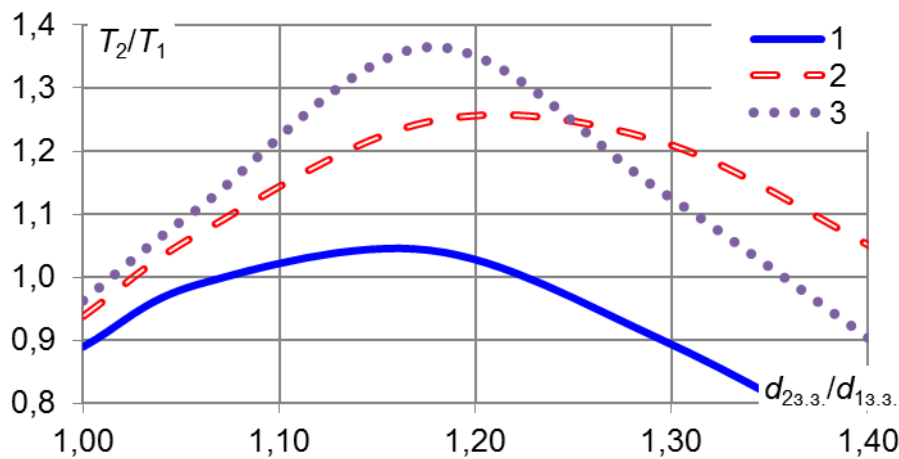


Рис. 2. Зависимость параметра  $T_2/T_1$  от эквивалентного диаметра зерен загрузки и рейтинга фильтрации: 1 –  $1d_p$ ; 2 –  $1,25d_p$ ; 3 –  $1,5d_p$

Данные, представленные на рис. 1 и 2, показывают, что доочистка суспензии на дренажной системе с пористой оболочкой является целесообразной при применении зернистой загрузки с большим эквивалентным диаметром зерен и при правильном подборе параметров самой перегородки. Уменьшение толщины перегородки или увеличение ее рейтинга фильтрации приводит к уменьшению времени работы фильтра в режиме фильтрования в результате ухудшения качества фильтрата (график 1 рис. 1, график 3 рис. 2). Увеличение диаметра зерен зернистой загрузки повышает нагрузку на пористую перегородку, что обуславливает ее быструю кольтматацию и уменьшение продолжительности фильтрования.

**Выводы.** Усовершенствована математическая модель последовательного фильтрования мало-концентрированной суспензии через слой зернистой загрузки и пористую перегородку из волокнистых полимерных материалов с постепенным закупориванием ее пор. Данная модель позволяет рассчитать рациональные параметры скорого фильтра с дренажной системой, используемой для доочистки, а также подтверждает эффективность данного решения.

### Список литературы

1. *Грабовский П.А.* Промывка водоочистных фильтров. Одесса: Оптимум, 2012. 240 с.
2. *Корінько І.В.* Інноваційні технології водопідготовки: [монографія]. Х.: ХНАМГ, 2012. 208 с.
3. *Водопостачання та очистка природних вод: [навч. посібник].* – Харків: Фактор, 2010. 192 с.
4. *Журба М.Г.* Водоснабжение. Проектирование систем и сооружений: в 3 т. [учеб. пособие]. Т. 2. Очистка и кондиционирование природных вод. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2010. 552 с.
5. *Бугай Н.Г.* Контактная реагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена. // Прикладна гідромеханіка. К., 2007. Т. 9, №1. С. 8–22.

6. Волков В.Н. Способы повышения эффективности работы фильтровальных сооружений. // Науковий вісник будівництва. Харків: ХНУБА, ХОТВ АБУ, 2015. №4(82). С. 150-154.

7. Эпоян С.М. Повышение эффективности работы фильтровальных сооружений при применении дренажных систем из пористых полимерных материалов // MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture. Lublin-Rzeszow, 2016. Vol. 18, № 6. P. 102-109.

8. Жужиков В.А. Фильтрация. [4-е изд., перераб. и доп.]. М.: Химия, 1980. 400 с.

*Надійшло до редакції 18.11.2016*

УДК 628.17

С.М. ЭПОЯН, доктор технических наук  
Харьковский национальный университет строительства и архитектуры  
С.И. МОВЧАН, кандидат технических наук  
Таврический государственный агротехнологический университет,  
г. Мелитополь,

### **МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ФЛОТОШЛАМА В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ФЛОТОКАМЕРЕ**

*Наведені результати дослідження розробленої конструкції конусного ущільнювача флотошлему дозволяють підвищити інтенсивність роботи як окремих складових водоочисного обладнання, так і всієї системи оборотного водопостачання у цілому. У відповідності із запропонованим технічним рішенням накопичення і механічне відведення флотошлему відбувається у верхній частині вертикальної флотокамери.*

**Ключові слова:** флотошлам, вертикальна флотокамера, камера реакції, камера флотації, діафрагма, вертикальні перегородки камери флотації, системи оборотного водопостачання.

*Представленные результаты исследования разработанной конструкции конусного уплотнителя флотошлема позволяют повысить интенсивность работы, как отдельных составляющих водоочистного оборудования, так и систем оборотного водоснабжения в целом. В соответствии с предлагаемым техническим решением накопление и механическое отведение флотошлема происходит в верхней части вертикальной флотокамеры.*

**Ключевые слова:** флотошлам, вертикальная флотокамера, камера реакции, камера флотации, диафрагма, вертикальные перегородки камеры флотации, системы оборотного водоснабжения.