



3. Разработана схема очистки сточных вод МНЛЗ. В качестве отстойных сооружений принято 10 тонкослойных флокуляторов (при этом четыре существующих флокулятора диаметром 12 м и 6 флотаторов диаметром 12 м переоборудуются в тонкослойные флокуляторы). Доочистка воды осуществляется на антрацито-кварцевых фильтрах (24 фильтра), устанавливаемых в существующем здании.

4. Предложена технология очистки масла, собранного в первичном отстойнике, флокуляторах и в отстойнике для промывных вод. Собранное масло подвергается длительному (16 часов) отстаиванию, а затем очистке на центробежных сепараторах, после чего направляется на повторное использование.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основные технические решения для проектирования сооружений для очистки вод комплекса конвер-

Розроблено технологію очищення стічних вод МБЛЗ ПАО «МК «АЗОВСТАЛЬ» від масел до остаточної кількості 1,0 мг/дм<sup>3</sup> при початковій концентрації 10 мг/дм<sup>3</sup>. Використано методики технологічного моделювання процесів флокуляції та подальшого відстоювання, а також фільтрування крізь зернисте завантаження (засипку). Для очищення води рекомендовано тонкошарові флокулятори та антрацито-кварцеві фільтри.

**УДК 628.334.51:622**

**В.Е. КОЛЕСНИК**, докт. техн. наук, профессор, **Д.В. КУЛИКОВА**, ассистент

Государственное высшее учебное заведение «Национальный горный университет» (ГВУЗ «НГУ»), г. Днепропетровск

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА РАБОТЫ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОГО ОТСТОЙНИКА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНОЙ ВОДЫ ОТ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

Даны значения основных гидравлических параметров перфорированных перегородок усовершенствованного горизонтального отстойника, для очистки сточной (или шахтной) воды от взвешенных веществ. Установлены зависимости значений чисел Рейнольдса для отверстий круглого сечения, обеспечивающих ламинарный режим течения воды, от величины ее расхода, приходящегося на единицу рабочей площади перегородок.

**Ключевые слова:** механическая очистка воды, сточная вода, горизонтальный отстойник, гидравлические параметры, ламинарный режим.

терного цеха комбината «АЗОВСТАЛЬ»: отчет о НИР / ВНИПИЧерметэнергоочистка ; рук. Пантелят Г.С. – Х., 1974. – 10 с. – Арх. № 20377.

2. Литейно-прокатный завод в г. Ярцево Смоленской области. Грязный оборотный цикл водоснабжения завода. Фильтровальная станция. Фильтр напорный диаметром 3000 мм с антрацито-кварцевой загрузкой (фильтр ФН-3000). Техническое задание 12064.00.000ТЗ / рук. А.В. Ерохин. – Х. : УкрГНТЦ «Энергосталь», 2005. – 42 с.
3. **Вейцер, Ю.И.** Высокомолекулярные флокулянты в процессах очистки природных и сточных вод / Ю.И. Вейцер, Д.М. Минц. – М. : Стройиздат, 1984. – 200 с.
4. **Бабенков Е.Д.** Очистка воды коагулянтами / Е.Д. Бабенков. – М. : Наука, 1997. – 380 с.
5. **Эпштейн, С.И.** К условиям подобию процесса фильтрации через зернистую загрузку / С.И. Эпштейн // Журнал прикладной химии. – 1995. – Т. 68, вып. 11. – С. 1849–1853

*Поступила в редакцию 10.04.2012*

Technology aimed at purifying waste water from continuous casting machines at PbJSC «Iron & Steel Works «Azovstal» against oils up to residual content of 1.0 mg/dm<sup>3</sup> at the initial concentration of 10 mg/dm<sup>3</sup> was developed. Simulation of technological processes of flocculation and subsequent sedimentation as well as filtration through granular charging was used. Water purification is recommended to do with using thin-flocculators and anthracite-quartz filters.

Широко применяющаяся в практике очистки сточных вод технология их отстаивания (осветления) является самой простой, наименее трудоемкой и относительно недорогой. Она обеспечивает выделение из загрязненной воды грубодисперсных примесей, плотность которых превышает плотность жидкости.

При расчете отстойных сооружений следует учитывать как их гидравлические параметры, так и факторы, характеризующие осветляемую воду. К первым относятся гидравлический режим течения (ламинарный, турбулентный или переходной), скорость движения воды, конструктивные особенности отстойника, его геометрические размеры и т.п. Факторы, характеризующие осветляемую воду и поведение осаждаемой взвеси, ограничиваются величиной гидравлической крупности взвешенных частиц (фактически скоростью их осаждения в воде), которая определяется экспериментальным путем.

При расчете отстойных сооружений важен наиболее полный учет действительных условий осаждения и взаимосвязи между основными расчетными параметрами. Однако, наличие комплекса физико-химических и гидравлических условий осаждения, влияющих на работу отстойного сооружения, не позволяет в настоящее время связать все факторы осаждения в одном математическом уравнении, которое можно было бы положить в основу расчета отстойника. Учитывая вышеизложенное, авторы поставили задачу моделирования гидравлического режима работы горизонтального отстойника усовершенствованной конструкции, заключающуюся в установлении зависимостей изменения значений чисел Рейнольдса для отверстий круглого сечения в перегородках отстойника, обеспечивающих ламинарный режим течения жидкости, от величины ее расхода, приходящегося на  $1 \text{ м}^2$  площади перегородки, при задаваемом диаметре упомянутых отверстий.

Одним из способов интенсификации работы существующих отстойных сооружений является усовершенствование их конструкций, при которых действительные скорости и время пребывания воды в отстойнике как можно меньше отличались бы от теоретических или расчетных.

Авторами предложена конструкция проточного горизонтального отстойника [1] для очистки промышленных сточных вод, загрязненных механическими примесями полидисперсного состава, путем их осаждения на дно сооружения под действием силы тяжести (рис. 1).

Главным отличием предложенной конструкции отстойника от традиционных сооружений механической очистки сточных вод от взвешенных веществ является то, что корпус отстойника выполнен в виде желоба, сужающегося по направлению к сливному отверстию (рис. 1,

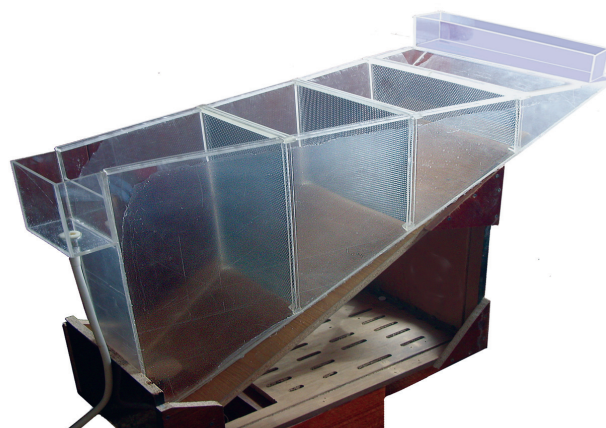


Рисунок 1 – Макет усовершенствованного горизонтального отстойника

слева) при одновременном увеличении глубины. Внутри желоба последовательно установлены перфорированные вертикальные поперечные перегородки с сечениями, соответствующими сечению корпуса отстойника. Эти перегородки с отверстиями разбивают поток осветляемой воды на множество отдельных струй с ламинарным течением и способствуют выравниванию скорости потока по сечению перегородок, что и обеспечивает интенсивное оседание частиц взвеси из потока, ламинарного по всем сечениям отстойника (или близкого к ламинарному), причем наиболее крупные частицы осаждаются на дно уже до первой перегородки. При этом неуспевшие осесть частицы поступают через отверстия в перегородках (преимущественно – нижние) в следующую секцию, где продолжают свое движение в направлении дна. Примечательно, что упомянутый ламинарный режим течения воды обеспечивают именно размеры отверстий в перегородках и низкие скорости течения воды в проточном отстойнике, что будет показано ниже.

Поскольку корпус установлен на опоре с наклоном днища в сторону сливного отверстия, обеспечивается сползание осадка, выпадающего в процессе осветления на дно в самую глубокую часть отстойника. Оттуда образовавшийся ил может периодически сливаться через отверстие в днище без остановки работы отстойника. При этом само днище корпуса представляет собой желоб, сечение которого имеет вид равнобедренного треугольника, основанием которого служит нижняя кромка прямоугольной перегородки. Таким образом, между днищем и перегородкой образуется зазор треугольной формы, что способствует беспрепятственному сползанию осевшего шлама преимущественно по оси днища.

Предложенная конструкция отстойника обеспечивает формирование равномерного по скорости и ламинарного по режиму потока с изменяющейся формой сечения – от неглубокого, но широкого – в области впуска очища-



емой воды, до узкого, но глубокого – в области слива. По мере продвижения воды, взвешенные частицы оседают на все большую глубину, поэтому в области слива образуется достаточно высокий слой осветленной воды, что позволяет сливать ее с минимальным захватом ила, который собирается ближе к днищу отстойника. Форма отстойника обеспечивает увеличение коэффициента объемного использования сооружения за счет отсутствия «застойных» зон, а также повышение интенсивности осаждения взвешенных частиц вследствие более равномерного распределения скорости потока по всей площади поперечного сечения. В конечном итоге повышается эффективность процесса осветления (очистки) сточной воды в целом.

В результате исследований, проведенных в лабораторных условиях ранее [2], были определены параметры реального отстойника, в частности скорости осаждения частиц взвеси, при которых обеспечивается заданный эффект осветления (очистки) воды, а также необходимая для этого продолжительность отстаивания. Критерием подобия процесса осаждения частиц взвеси в действующем макете и в реальном отстойнике является сохранение режима течения воды, а также удельного количественного и гранулометрического составов взвеси. При этом реальный состав взвеси определялся на основе анализа гранулометрического состава осадка шахтных вод из водосборников некоторых шахт [3]. Приблизительный дисперсный состав осадка частиц взвеси, содержащихся в шахтной воде, приведен в табл. 1.

**Таблица 1 – Приблизительный дисперсный состав частиц взвеси, содержащихся в осадке шахтной воды**

Крупность фракций, мкм	Содержание фракции, %
менее 5	35,6
5–10	12,3
10–20	14,0
20–30	12,8
30–50	13,5
более 50	11,8

С учетом приведенного дисперсного состава реальной взвеси были подобраны пять типов веществ, которые смешивались и использовались для моделирования процесса осаждения взвеси на действующем макете. Тип отобранных примесей и приблизительный размер их частиц приведены в табл. 2.

Кинетика осаждения частиц исследовалась в цилиндре-седиментаторе, высота осветляемой воды в котором соответствовала высоте перегородок макета отстойника [2]. Для этого, с учетом данных табл. 1 и 2,

**Таблица 2 – Тип примесей для проведения физического моделирования процесса осаждения взвешенных веществ и приблизительный размер их частиц**

Тип примеси	Приблизительный размер частиц взвеси, d, мкм
Тонкозернистый песок	более 50
Ил крупный	27
Пылевидная масса	15
Ил мелкий	10
Глина	3 (2,7)

готовился водный раствор смеси упомянутых компонентов. Концентрация взвеси в растворе составила 200 мг/л при содержании тонкозернистого песка – 11,8 %, ила крупного – 26,3 %, пылевидной массы – 14 %, ила мелко – 12,3 % и глины – 35,6%. Эффект очистки воды оценивался количеством частиц различного типа, осевших из приготовленного раствора на дно цилиндра-седиментатора. Количество осевших частиц в процентах определялось по стандартной методике [4] путем периодического отбора проб осветляемой воды, которая выпаривалась с последующим определением массы осадка и вычислением массы неосевшей взвеси.

В результате проведенных исследований кинетики осаждения взвеси установлено, что при заданных значениях высоты перегородок макета предлагаемого отстойника и отверстий в них, а также при типовом дисперсном составе взвешенных веществ в шахтной воде оцениваемое количество выпавших в осадок частиц взвеси составит приблизительно 60 %.

Полученное значение практически вдвое выше эффективности очистки воды в традиционных горизонтальных отстойниках, применяемых на угледобывающих предприятиях. В традиционных отстойниках эффект осветления воды составляет в среднем 30 %, а значит, в осадок выпадают лишь довольно крупные частицы, гидравлическая крупность которых превышает  $U_0 = 0,47$  мм/с [2].

Приступая к решению поставленной авторами задачи моделирования гидравлического режима, следует отметить, что расчет реальных отстойников основан на элементарной теории горизонтальных осадочных бассейнов, предложенной В.Т. Турчиновичем [5]. Эта теория базируется на допущениях:

1. Движение воды в отстойнике происходит при ламинарном режиме.
2. Величина горизонтальной скорости движения воды в отстойнике во всех сечениях потока постоянна и принимается по всей глубине равной ее средней величине.
3. Отстойником могут быть задержаны все частицы, траектории движения которых (в процессе их осаждения) пересекают плоскость дна отстойника.

4. Скорость осаждения частиц постоянна, т.е. укрупнения и разрушения частиц взвеси не наблюдается.

5. Размеры отстойника должны быть рассчитаны на наиболее неблагоприятные условия, т.е. должно выполняться условие задержания частиц, находящихся в момент впуска воды в отстойник в верхнем слое потока, поскольку они проделывают наиболее длинный путь до дна.

Для проектирования сооружений механической очистки сточных вод должны быть заданы следующие параметры:

- общее количество сточных вод (расход потока жидкости, требующей очистки) и периодичность их образования;
- температура подаваемых стоков;
- концентрация взвешенных веществ в сточной воде;
- экспериментальные данные о кинетике осаждения характерных механических примесей, плотность которых превышает плотность воды [6].

Для определения производительности отстойных сооружений, в частности, используемых на шахтах, необходимо располагать сведениями о притоках шахтной воды за последние несколько (3–5) лет и прогнозом притоков на период отработки запасов угля. Прогнозные данные о притоках шахтной воды должны учитывать возможные их изменения в результате расширения предприятия, совершенствования технологии работ, вскрытия новых горизонтов, улучшения условий и безопасности производства. Важное значение имеют также пределы и длительность сезонных колебаний притоков воды.

Установить величину притока шахтной воды можно на основании данных, которые содержатся в форме государственной статистической отчетности – 2-ТП (водхоз), которую ежегодно заполняют на предприятиях угольной промышленности с указанием количества шахтной воды, извлекаемой из недр на поверхность в процессе производственной деятельности.

Таким образом, величина шахтного водоотлива является первичным показателем, на основании которого будет проводиться моделирование гидравлических параметров усовершенствованного горизонтального отстойника.

Перегородки в предложенной авторами конструкции горизонтального отстойника играют важную роль. Как отмечалось, они способствуют выравниванию скорости потока по сечению и обеспечивают установление ламинарного режима течения очищаемой воды в отстойнике. В качестве перегородок предложено устанавливать перфорированные металлические листы с отверстиями круглой формы, совокупность которых образует шестиугольники (при моделировании гидравлического режима диаметры отверстий ( $d$ ) варьировались в диапазоне от 2,5 до 10 см).

Как известно, режим движения жидкости зависит от значения числа Рейнольдса ( $Re$ ) [7]. Поэтому в качестве критического значения числа  $Re$ , характеризующего ламинарный режим движения для отверстий круглого сечения, выбираем  $Re_{кр} = 2000$ . Выше этого числа ламинарный режим течения будет нарушаться, постепенно переходя в турбулентный. Учитывая возможные изменения скорости потока, процесс моделирования основных гидравлических параметров отстойника будем вести в диапазоне значений  $Re = 100–2000$ .

Определенное влияние на гидравлический режим работы отстойных сооружений оказывает температура подаваемой на очистку воды, поскольку изменение температурного режима жидкости вызывает изменение ее вязкости, которая, в свою очередь, влияет на эффективность очистки. Так, при уменьшении температуры воды ее вязкость увеличивается, а эффект осветления, наоборот, уменьшается. Поэтому при моделировании гидравлического режима условно примем температуру воды равной  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , для которой коэффициент кинематической вязкости составит  $\mu = 0,0101\text{ см}^2/\text{с}$ . При изменении температуры, которое возможно в производственных условиях, необходимо вводить поправку на изменение вязкости воды для ее соответствующих значений [7].

Прежде чем приступить к установлению зависимости изменения значений чисел Рейнольдса для разных отверстий от величин расхода воды, приходящейся на  $1\text{ м}^2$  рабочей площади перегородок при ламинарном режиме течения, предварительно определим основные гидравлические параметры перегородок. Так, зная диаметр отверстий перегородки ( $d$ ) и расстояние между ними ( $p$ ), можно рассчитать коэффициент пропускания воды ( $k$ ) через сечения перегородок в расчете на  $1\text{ м}^2$  их рабочей площади. Поскольку отверстия расположены по шестиугольнику (рис. 2), коэффициент  $k$  находим как отношение площади отверстий, вписанных в шестиугольник ( $F$ ), к общей площади этого шестиугольника ( $S_{\text{шестиуг.}}$ ).

Результаты расчета основных гидравлических параметров перегородок при различном диаметре отверстий представлены в табл. 3.

Величину расхода воды, проходящей через сечения перегородок отстойника, определяем по формуле

$$Q = S \cdot k \cdot v, \quad (1)$$

где  $S$  – рабочая площадь перегородок отстойника,  $\text{м}^2$ ;  $v$  – скорость потока жидкости, проходящей через сечения перегородок отстойника,  $\text{м}/\text{с}$ , которую определим согласно критерию Рейнольдса  $Re = \frac{v \cdot d}{\mu}$  [7] для отверстий круглого сечения, откуда найдем скорость потока через них в виде  $v = \frac{Re \cdot \mu}{d}$ .

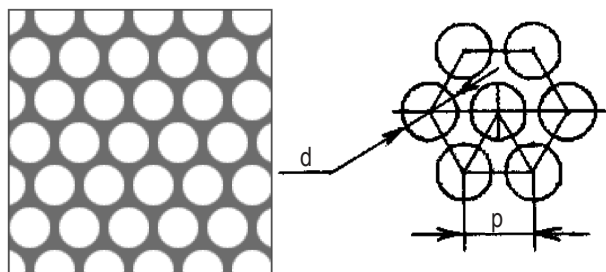


Рисунок 2 – Схема круглой перфорации со смещенными рядами по шестиугольнику: d – диаметр отверстия, см; p – расстояние между центрами отверстий, см

В результате, при  $S=1 \text{ м}^2$

$$Q = \frac{S \cdot k \cdot \text{Re} \cdot \mu}{d} = \frac{k \cdot \text{Re} \cdot \mu}{d} \quad (2)$$

По формуле (2) можно рассчитать расход воды, проходящей на  $1 \text{ м}^2$  рабочей площади перегородок для значений чисел Рейнольдса, изменяющихся в диапазоне  $\text{Re}=100\text{--}2000$ .

С использованием параметров перегородок и величин расхода воды, согласно математической модели (2), получены зависимости изменения значений чисел

Таблица 3 – Основные гидравлические параметры перегородок отстойника

Диаметр отверстия, d, см	Расстояние между центрами отверстий, p, см	Площадь F, м <sup>2</sup>	Общая площадь S <sub>шестиугр</sub> , м <sup>2</sup>	Коэффициент k в расчете на 1 м <sup>2</sup> рабочей площади перегородок
2,5	3,0	0,001472	0,00234	0,629
3,0	3,6	0,00212	0,00337	0,629
3,6	4,2	0,00305	0,00459	0,666
4,0	4,6	0,00377	0,005498	0,685
5,0	5,8	0,00589	0,00874	0,674
6,0	6,9	0,00848	0,01238	0,685
7,0	8,0	0,01154	0,01663	0,694
8,0	9,2	0,01507	0,02199	0,685
9,0	10,2	0,019076	0,02703	0,706
10,0	11,5	0,02355	0,03436	0,685

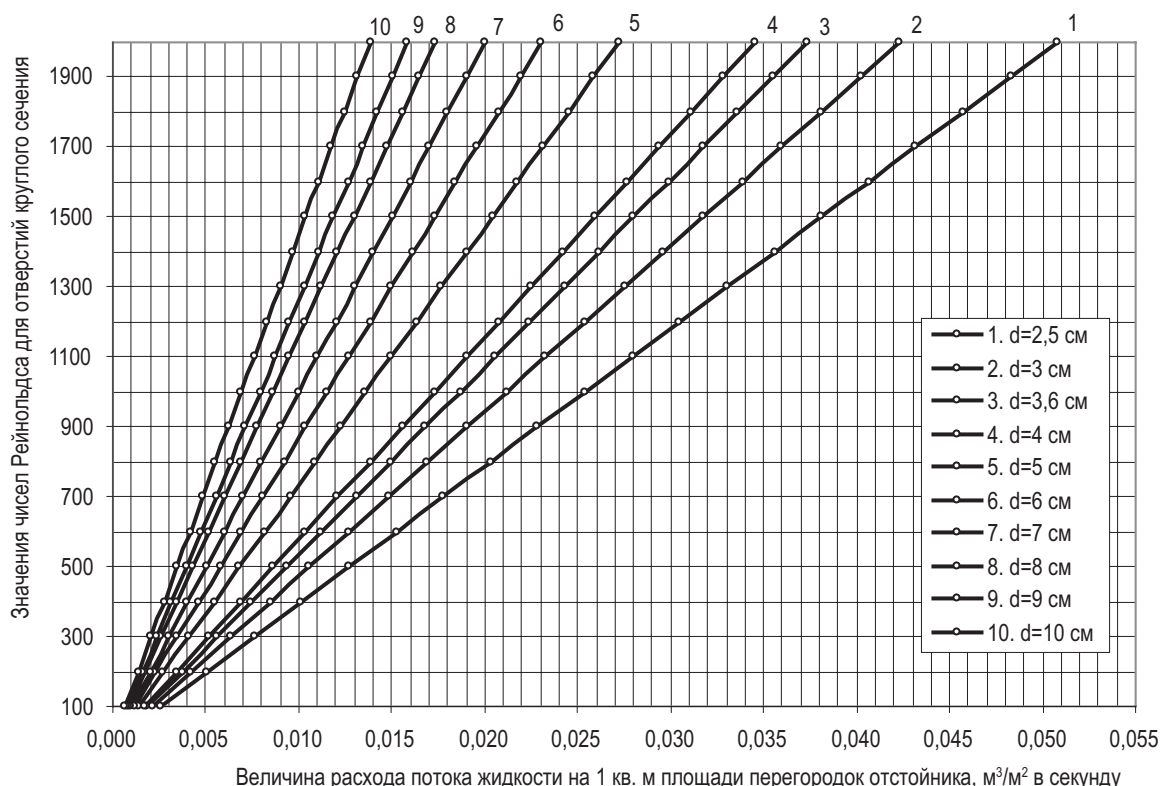


Рисунок 3 – Номограммы изменения значений чисел Рейнольдса для задаваемых диаметров отверстий круглого сечения, обеспечивающих ламинарный режим течения жидкости, от величин ее расхода в расчете на  $1 \text{ м}^2$  рабочей площади перегородок

Рейнольдса для отверстий круглого сечения, обеспечивающих ламинарный режим течения жидкости, от величины расхода воды в расчете на 1 м<sup>2</sup> рабочей площади перегородок отстойника при задаваемых диаметрах упомянутых отверстий. Эти зависимости представлены на рис. 3 в виде номограмм.

Пользуясь номограммами, представленными на рис. 3, при проектировании реального отстойника можно подобрать (с учетом требуемого расхода воды) такой диаметр отверстий перегородок, при котором число Re не превысит критического значения ( $Re < Re_{кр}$ ) и поток останется ламинарным. Значения  $Re_{кр}$  для реальных отстойников обычно рекомендуют принимать до 500 [8].

### ВЫВОДЫ

В процессе моделирования гидравлического режима работы отстойника усовершенствованной конструкции, предназначенного для очистки сточной воды от взвешенных веществ, были получены следующие результаты:

1. Моделирование кинетики осаждения взвеси при заданных значениях высоты перегородок макета предлагаемого отстойника и отверстий в них, а также при типовом дисперсном составе взвешенных веществ в шахтной воде позволило оценить количество выпавших в осадок частиц взвеси, которое составило приблизительно 60 %, что практически вдвое выше эффективности применяемых отстойников.

2. Определены значения основных гидравлических параметров перегородок отстойника при различном размере диаметра их отверстий, на основании которых осуществляется моделирование его гидравлического режима.

3. Рассчитаны номограммы зависимости значений чисел Рейнольдса для отверстий круглого сечения, обеспечивающих ламинарный характер течения воды в отстойнике, от ее расхода, приходящегося на 1 м<sup>2</sup> рабочей площади перегородок. При наличии данных о количе-

стве воды, подаваемой в отстойник на очистку, и задаваемом диаметре отверстий перегородок можно установить «критический» расход воды, при котором режим ее движения будет оставаться ламинарным с устойчивым течением.

Полученные значения и зависимости могут быть использованы при проектировании реального отстойника предложенного типа.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. № 55988 Украина, МПК<sup>8</sup> В 01 D 21/02. Пристрій для очистки скидів від завислих речовин / Колесник В.Є., Кулікова Д.В. – Заявл. 12.10.2010 ; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. – 4 с.
2. Горшков, В.А. Очистка и использование сточных вод предприятий угольной промышленности / В.А. Горшков. – М. : Недра, 1981. – 269 с.
3. Колесник, В.Е. Экспериментальные исследования усовершенствованного горизонтального проточного отстойника шахтной воды на действующем макете / В.Е. Колесник, Д.В. Куликова // Матеріали Міжнародної конференції «Форум гірників-2011», 12–15.10.11., м. Дніпропетровськ / Національний гірничий університет. – Д., 2011. – С. 134–143.
4. Руководство по анализу шахтных вод. – Пермь : ВНИИОСуголь, 1980. – 283 с.
5. Турчинович, В.Т. Водоснабжение промышленных предприятий и населенных мест. Ч. III. Улучшение качества воды / В.Т. Турчинович. – М. : Стройиздат, 1940. – 348 с.
6. Фрог, Б.Н. Водоподготовка / Б.Н. Фрог, А.П. Левченко. – М. : МГУ, 1996. – 680 с.
7. Рабинович, Е.З. Гидравлика / Е.З. Рабинович. – М. : Недра, 1980. – 280 с.
8. Воловник, Г.И. Теоретические основы очистки воды. Ч. 1. Водные загрязнения. Регенеративная очистка / Г.И. Воловник. – Хабаровск : ДВГУПС, 2007. – 162 с.

*Поступила в редакцию 22.02.2012*

Надано значення основних гідравлічних параметрів перфорованих перегородок удосконаленого горизонтального відстійника для очищення стічних (або шахтних) вод від завислих речовин. Установлено залежності значень чисел Рейнольдса для отворів круглого перерізу, що забезпечують ламінарний режим течії води, від величини її витрат, які припадають на одиницю робочої площини перегородок.

The values of the basic hydraulic parameters of perforated partitions of the proposed by the authors horizontal sedimentation tank of improved construction for waste water (mine water) treatment against suspended solids are obtained. The dependences of the values of Reynolds criterion for circular cross-section openings that provide laminar flow of water from the values of flow rate, which accounts per unit of the operating area of partitions, are established.