

РОМАН РЕНАТОВИЧ АЮКАЕВ

кандидат технических наук, инженер ООО «Коммунжилпроектинвест»

chistayavoda@rambler.ru

ЕЛЕНА ОЛЕГОВНА ГРАФОВА

кандидат технических наук, ассистент кафедры водоснабжения, водоотведения и гидравлики строительного факультета ПетрГУ

chistayavoda@rambler.ru

РЕНАТ ИСХАКОВИЧ АЮКАЕВ

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой водоснабжения, водоотведения и гидравлики

chistayavoda@rambler.ru

ЕВГЕНИЙ ВИКТОРОВИЧ ВЕНИЦИАНОВ

доктор физико-математических наук, профессор Института водных проблем РАН, г. Москва

venits@aqua.laser.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
В ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССОВ ВОДООЧИСТКИ
Сообщение 1. Медленное фильтрование

В водоснабжении загородных объектов перспективно применение медленных фильтров. В статье приводятся результаты математического моделирования процесса регенерации загрузки медленных фильтров. Дано объяснение эффекта концентрации отмытых загрязнений в центре цилиндрического фильтра за счет закручивания надфильтрового объема воды.

Ключевые слова: медленное фильтрование, регенерация, математическое моделирование, водоснабжение загородных объектов

В работах [1], [2] показана высокая эффективность применения технологии медленного и «сухого» фильтрования при инженерном обустройстве загородных объектов типа придорожных кемпингов, гостиниц, автозаправочных станций.

При переносе известных конструкторских решений по сооружениям большой производительности на сооружения малой и средней производительности эффективным оказывается применение методов математического моделирования. Удачно построенная феноменологическая модель и подобранная для ее исследования математическая модель зачастую позволяют прояснить физику процесса, выйти на инженерные методы его расчета или приблизиться к ним. При этом удается избежать грубых ошибок в построении программ экспериментальных исследований, сократить объем и упростить технологию экспериментов.

Одной из причин исчезновения из практики водоподготовки простых в строительстве, надежных в работе медленных фильтров послужили неудобства в проведении работ по регенерации

загрузки. Так, традиционная технология включает в себя осушение песчаной загрузки и последующее механическое удаление слоя образовавшейся за фильтроцикл пленки. После каждого фильтроцикла вследствие чрезвычайно антисанитарных условий удаления осадка проводилась тщательная дезинфекция конструкции фильтра и загрузки, что существенно затягивало формирование биопленки с бактерицидным эффектом. В последующие годы появилась технология регенерации загрузки медленных фильтров смывом задержанных загрязнений струей воды.

Однако эта технология не нашла широкого применения по причине чрезвычайно больших затрат на насосное оборудование и резервуары промывной воды, сложностей перемещения водоструйного устройства и приема промывного потока боковыми желобами.

В работах Ю. И. Коренева [3] по промывке загрузки скрытых фильтров, А. Ф. Порядина [6] по инфильтрационным водозаборам обсуждается метод регенерации, который позволяет извлекать

частицы загрязнений из зернистого слоя с помощью высоконапорных нисходящих водяных струй.

Применительно к регенерации медленного фильтра более предпочтительным с позиции снижения энергозатрат оказалось перемещение насадки не над загрузкой, а в ее толще. В этом случае имеет место ординарная для технологии скребкового фильтрования регенерация зернистого слоя в восходящем потоке воды. Фильтр сканируется струей воды, подаваемой вглубь загрузки через гибкий шланг с жестким наконечником. Расход промывного потока подбирается из условия обеспечения гидравлической сортировки (отмычки) песка в зоне действия факела такой струи.

Вынесенная из толщи загрузки взвесь оседает на поверхности загрузки. Взвесь легко подвижна и хорошо удаляется илососом.

Разработанная технология регенерации загрузки медленного фильтра сканированием рыхлителя смонтирована нами и успешно эксплуатируется на протяжении более 10 лет на станции очистки воды озера Укшозеро госрезиденции президента РФ «Шуйская Чупа» под Петрозаводском. При ординарном качестве исходной воды и продолжительности фильтроциклов порядка 60–75 суток все операции по промывке загрузки и удалению илососом отмытых загрязнений проводились вручную.

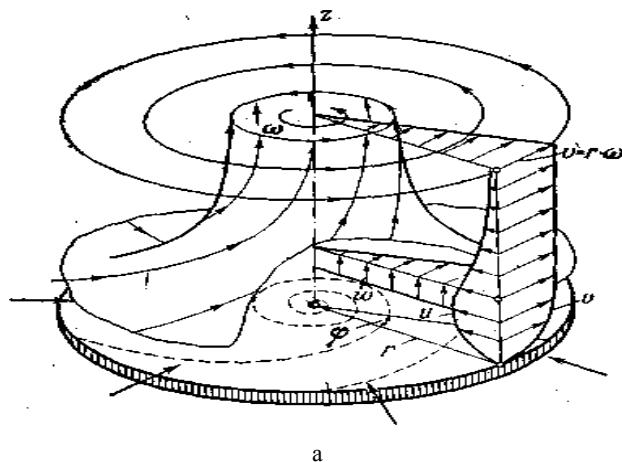
В неординарные периоды года требовалась реагентная обработка озерной воды, что сокращало продолжительность фильтроциклов до 2–3 суток. В этих условиях обслуживание достаточно удаленного от города объекта стало делом трудоемким. Потребность в автоматизации регенерационного процесса привела к попытке применить для перемещения осадка к центральной воронке апробированный в радиальных отстойниках скребковый механизм. Опыт оказался неудачным из-за чрезвычайной подвижности осадка гидроокиси.

Аналогичная картина «вспухания» осадка гидроокиси алюминия с сорбированными органическими загрязнениями наблюдалась нами при попытках убрать его илососом со дна плавательного бассейна.

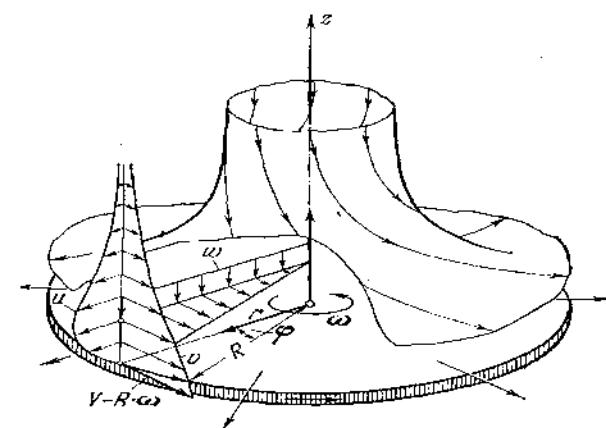
В поисках оптимального конструктивного оформления системы удаления из фильтра отмытых легкоподвижных загрязнений мы обратились к методу математического моделирования, широко и успешно применяемого в гидромеханике.

При регенерации медленных фильтров цилиндрической формы с диаметром 1500 мм на водоочистной станции «Шуйская Чупа» в период реагентной предподготовки озерной воды нам удалось организовать эффективный выпуск осадка гидроокиси алюминия за счет закручивания воды в надзагрузочном объеме. Погружной насос был расположен в центре, напорным шлангом вода подавалась по касательной. Через некоторое время, после выключения насоса, движение жидкости останавливалось, и работа насоса переключалась на выброс скопившегося в центре осадка.

На рис. 1 представлены две интересные для нашего случая модели из монографии Г. Шлихтинга по теории пограничного слоя [8].



а



б

Рис. 1. Графическое изображение результатов математического моделирования процесса регенерации медленного фильтра: а – течение в окрестности диска (скребка), вращающегося в покоящейся жидкости; б – вращательное движение жидкости над неподвижным основанием (над поверхностью загрузки)

Модель № 1. Вращающийся в покоящейся жидкости диск имитирует вращение скребкового механизма радиального отстойника с плоским днищем. Вследствие трения слой жидкости, непосредственно прилегающей к диску, увлекается последним и под действием центробежной силы отбрасывается наружу от диска. Взамен отброшенной жидкости к диску сверху в осевом направлении притекает новая жидкость, которая также увлекается диском и снова отбрасывается наружу.

Модель № 2. Жидкость, вращающаяся над неподвижным плоским основанием, имитирует безнапорный гидроциклон с центральным выпуском осадка. Для частиц жидкости, находящихся вблизи дна, окружная скорость вследствие торможения понижена, поэтому здесь цен-

тробежная скорость значительно уменьшена, между тем как направленный внутрь радиальный градиент давления остается таким же, как и на большом расстоянии от дна. В результате вблизи дна возникает направленное внутрь радиальное течение, которое вызывает, в свою очередь, вследствие условия неразрывности восходящее течение в осевом направлении.

Для подробного анализа выбрана вторая модель как отвечающая задаче концентрации легкоподвижного гидроксидного осадка в центре цилиндрической формы медленного фильтра.

Рассмотрим эту модель движения закрученной жидкости над неподвижным основанием в такой последовательности: распределение скоростей и затем модель закручивания жидкости турбулентной струей.

Модель вращательного движения жидкости над неподвижным основанием была решена для вращающейся жидкости без стенок, то есть для модели бесконечного цилиндра. Для адаптации этой модели к реальным условиям медленного фильтра цилиндрической формы ограниченного диаметра нами проведены преобразования.

Постановка задачи. Вязкая жидкость вращается над неподвижной плоской стенкой с постоянной угловой скоростью ω . Рассматривается установившееся движение. Вследствие прилипания скорость жидкости при $z = 0$ (z – вертикальная ось) равна нулю. Для частиц жидкости, находящихся на большом удалении от неподвижного основания (большие значения координаты z), центробежная сила, возникающая за счет вращения жидкости, уравновешивается радиальным градиентом давления. Это проявляется в возникновении «воронки» на поверхности вращающейся жидкости.

Однако вблизи неподвижного дна окружная скорость вследствие прилипания понижена. Между тем радиальный градиент давления остается таким же, как и на большом расстоянии от стенки. Вследствие этого градиента возникает радиальное течение к центру ($x = y = 0$). В результате неразрывности потока возникает восходящее течение в осевом направлении, которое называется вторичным течением.

Вторичное течение легко наблюдать в стакане с мелкими чаинками, когда жидкость размешивается ложечкой. После того как мы создадим круговое движение и вынем ложечку, вследствие кругового движения вблизи дна стакана возникнет радиальное движение, направленное внутрь, к центру дна, а также восходящий поток по вертикальной оси стакана. В результате чаинки собираются в середине дна, образуя «холмообразную» структуру.

Аналитическое решение задачи. Используется математическое решение, приведенное в книге Г. Шлихтинга [8]. Вводится цилиндрическая система координат (рис. 2): r – радиальная координата от центра, $r = 0$, φ – угловая координата, z – вертикальная координата ($z = 0$ – твердая стенка).

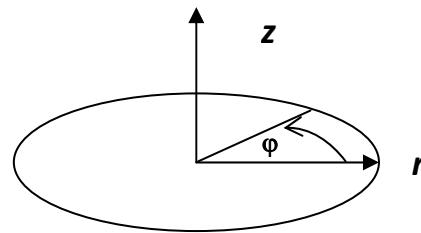


Рис. 2. Цилиндрическая система координат

Поскольку решается задача без ограничивающих стенок, на большом расстоянии от стенки жидкость вращается как твердое тело с угловой скоростью ω . Составляющие скорости в радиальном, окружном и вертикальном направлениях обозначим соответственно как u , v , w (рис. 3).

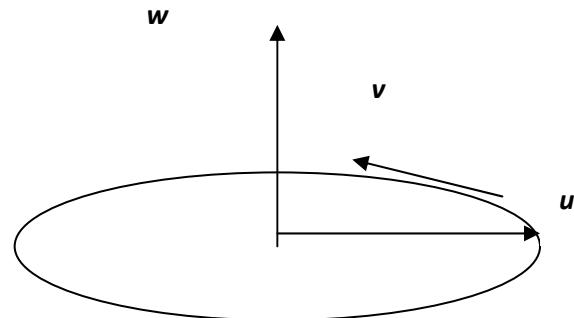


Рис. 3. Направления скоростей w , v , u

Задача имеет осевую симметрию, так что все функции не зависят от угловой координаты φ . Поэтому выпадают все производные по φ в уравнениях Навье – Стокса, и система принимает вид:

$$u \frac{\partial u}{\partial r} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{v^2}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + v \left\{ \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{u}{r} \right) + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right\} \quad (1a)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial r} + \omega \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{uv}{r} = v \left\{ \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right\} \quad (1b)$$

$$u \frac{\partial \omega}{\partial r} + \omega \frac{\partial \omega}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + v \left\{ \frac{\partial^2 w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \omega}{\partial r} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right\} \quad (1b)$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (1g)$$

Границные условия:

$$\begin{aligned} u &= v = w = 0 \text{ при } z = 0, \\ u &= 0, v = r\omega \text{ при } z = \infty. \end{aligned} \quad (2)$$

На большом удалении от стенки течение проходит без влияния вязкости, жидкость вращается как единое недеформируемое тело, и градиент давления можно найти из уравнения (1a).

$$(1/\rho) \partial p / \partial r = v^2/r.$$

Поскольку на удалении от пластины радиальная скорость определяется по формуле для твердого тела:

$$v = r\omega,$$

получим для градиента давления выражение:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \rho r \omega^2. \quad (3)$$

Поскольку положение поверхности вращающейся жидкости определяет градиент давления в соответствии с (3), можно найти уравнение поверхности вращающейся жидкости:

$$Z_{\text{нов}} = Ar^2, \quad (4)$$

то есть $Z_{\text{нов}}$ меняется по параболическому закону, где A – коэффициент:

$$A = \omega^2/2.$$

Отметим, что по перепаду высот жидкости можно определить угловую скорость вращения («закрутки») ω слоя жидкости. Для этого надо измерить перепад высот поверхности между центром вращения (положим $Z_{\text{нов}} = 0$ при $r = 0$) и половиной радиуса цилиндра, в котором вращается жидкость ($Z_{\text{нов}} = Z_{0,5}$ при $r = 0,5R$ – половине радиуса цилиндра). Выбор такой точки отсчета связан с тем, что решение системы (1) получено в предположении, что вращается слой жидкости без стенок (бесконечного радиуса). Реально всегда имеется стенка и вблизи стенки обязательно влияние прилипания, то есть решение (1) вблизи стенки цилиндра нарушается. Однако вблизи центра (до половины радиуса R) влиянием стенки можно пренебречь и использовать решение (4).

Значения радиальной U , окружной V и осевой (вертикальной) W составляющих скорости движения жидкости

ζ	U	V	W	ζ	U	V	W	ζ	U	V	W
0	0	0	0	5,0	0,103	1,003	1,478	10,0	0,000	1,009	1,390
0,5	-0,343	0,382	0,190	5,5	0,074	0,969	1,390	10,5	0,003	1,007	1,386
1,0	-0,468	0,731	0,614	6,0	0,041	0,954	1,332	11,0	0,004	1,005	1,382
1,5	-0,437	1,004	1,076	6,5	0,013	0,953	1,308	11,5	0,003	1,002	1,380
2,0	-0,318	1,175	1,460	7,0	-0,010	0,959	1,304	12,0	0,001	1,000	1,380
2,5	-0,171	1,246	1,704	7,5	-0,020	0,975	1,320	12,5	0,000	1,000	1,380
3,0	-0,038	1,242	1,800	8,0	-0,023	0,990	1,340	∞	0,000	1,000	1,380
3,5	0,056	1,192	1,784	8,5	-0,020	1,00	1,364				
4,0	0,106	1,123	1,702	9,0	-0,013	1,007	1,382				
4,5	0,117	1,056	1,590	9,5	-0,006	1,010	1,390				

Из полученного решения можно сделать следующие практические выводы:

1. Максимальное значение осевой скорости достигается на высоте $\zeta = 3,1$ и равно:

$$w_{\max} = 1,8(\nu\omega)^{0.5}.$$

Поскольку давление создается столбом жидкости, то для горизонтальной поверхности, проведенной через самую низкую точку поверхности жидкости ($Z_{\text{нов}} = 0$ при $r = 0$), для точек окружности, проведенных на половине радиуса цилиндра ($r = 0,5 R$), давление будет равно:

$$p = Z_{0,5} \rho g, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения (атмосферное давление для всех точек не учитывается, поскольку в уравнении входит градиент давления).

Тогда из (4) и (5) получим:

$$\omega = (8 Z_{0,5} g)^{0.5}/R.$$

Математическое решение системы (1) приведено в [7]. Вводится безразмерная переменная:

$$\zeta = z (\omega/v)^{0.5},$$

а также безразмерные скорости

$$U(\zeta) = u/(r\omega), V(\zeta) = v/(r\omega), W(\zeta) = w/(r\omega)^{0.5}.$$

В безразмерных переменных граничные условия (2) примут вид:

$$U = V = W = 0 \text{ при } \zeta = 0, U = 0, V = 1 \text{ при } \zeta = \infty,$$

а сама система (1) примет вид:

$$U^2 - V^2 + WU' - U'' + 1 = 0 \quad 2UV + WV' - V'' = 0 \quad 2V + W' = 0.$$

Эту систему можно решить численным методом. Значения функций U , V , W представлены в таблице, а также на рис. 4 и 5.

Поскольку $v = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$, а величина «закрутки» порядка $0,1 \text{ с}^{-1}$ (один оборот за 10 с), то типичная величина

$$w_{\max} \sim 0,05\text{--}0,10 \text{ см/с}.$$

Это значит, что частицы с гидравлической крупностью порядка 0,5 мм/с и меньше могут

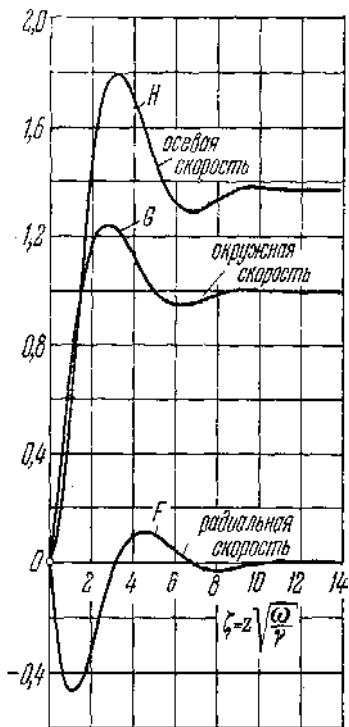


Рис. 4. Распределение скорости в пограничном слое, образующемся при вращении жидкости вблизи неподвижного основания

быть перемещены к центру неподвижного дна. Более точные значения гидравлической крупности частиц взвеси можно установить экспериментально. Такое уточнение связано с тем, что решение получено в предположении, что неподвижная поверхность имеет бесконечный радиус. Реально всегда имеются вертикальные цилиндрические стенки, на которых скорость потока также равна нулю. Это приводит к снижению величины w_{max} .

2. Величина и направление радиальной скорости зависят от расстояния от поверхности загрузки. Для высоты $\zeta \leq 3$ (или в размерных переменных $z \leq 3(\omega/v)^{0.5}$, то есть $z \leq 10$ см) скорость направлена к центру дна. Следовательно, для этого слоя жидкости существует центростремительное движение жидкости, увлекающее частицы взвеси. Высота формирующегося «холма» частиц порядка 10 см и увеличивается с ростом скорости вращения (10 см для скорости вращения один оборот за 10 с, далее высота растет пропорционально $\omega^{0.5}$. При увеличении скорости вращения в 2 раза высота «холма» возрастает в 1,4 раза).

Закручивание потока в цилиндре турбулентной струей. В задаче удаления осадка гидроокиси с поверхности загрузки отличие гидродинамического режима от гидроциклона принципиальное: в гидроциклоне необходимо достичь турбулентного режима. Тогда происходит «включение» центробежного механизма.

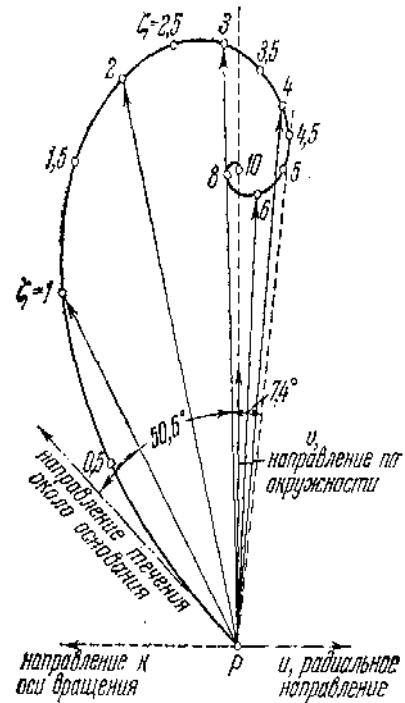


Рис. 5. Векторная диаграмма горизонтальной составляющей скорости в пограничном слое, образующемся при вращении жидкости вблизи неподвижного основания

Напротив, в нашем случае режим кругового вращения должен быть ламинарным, когда формируется пограничный слой и происходит концентрирование осадка в центре загрузки в форме «холма». Это требование является принципиальным, поэтому применение устройств закрутки потока, которые применяются в гидроциклонах (например, лопастей), здесь невозможно. Требование ламинарности накладывает ограничения на скорость закрутки потока.

Известно решение Тейлора об устойчивости вращательного движения между цилиндрами [4]. При вращении жидкости в цилиндре потеря устойчивости происходит в зависимости от числа Рейнольдса, которое в нашем случае следует брать в виде:

$$Re = \omega R^2 / v.$$

Если принять для критической области значение $Re \sim 10^4$, то получим выражение для угловой скорости закрутки:

$$\omega \sim 200/R^2,$$

где ω измеряется в s^{-1} , а R – в см. Для радиуса фильтра порядка 70 см критическая область лежит в области $\omega > 0,04 s^{-1}$. Эта величина ориентировочная, поэтому необходим контроль за тем, чтобы движение жидкости было ламинарным. Для окружной скорости эта величина должна иметь порядок 4 см/с.

Следующий этап – оценка скорости истечения жидкости из сопла для «закрутки» потока. Задача о распределении скоростей в покоящейся вязкой жидкости при истечении из конца трубы турбулентной струи (задача о «затопленной струе») рассмотрена в монографии [5].

На больших по сравнению с размером отверстия трубы расстояниях струя аксиально симметрична вне зависимости от формы отверстия. Вследствие радиальной симметрии радиус области R_t турбулентности зависит только от расстояния x , пройденного струей при закрутке. В соответствии с приведенным в указанной монографии решением, радиус области R_t турбулентности пропорционален расстоянию x :

$$R_t = \operatorname{tg} \alpha \cdot x, \quad (6)$$

где $\alpha \approx 12,5^\circ$.

Решение задачи о попутном движении жидкости вне турбулентной области приводит к выводу, что отношение

$$(u_x)_{\text{пот}} / (U_x)_{\text{ср}} = (1 - \operatorname{Cos} \alpha) / 2, \quad (7)$$

где $(u_x)_{\text{пот}}$ – скорость в ламинарном (покоящемся первоначально) слое на границе с турбулентной струей; $(U_x)_{\text{ср}}$ – средняя скорость в турбулентной (закручивающей) струе.

При $\alpha \approx 12,5^\circ$ получаем для этого отношения значение 0,011, то есть на границе турбулентной области скорость мала по сравнению со средней скоростью потока внутри турбулентной струи.

Таким образом, «закручивание» потока в цилиндре происходит в основном за счет расширения турбулентной струи. Значение угла расширения струи получено в упрощающем предположении о плоском безграничном потоке, так что в реальных условиях величина будет несколько меньше.

Для получения достаточной закрутки всего объема жидкости следует учесть, что вследствие наличия стенки максимальные окружные скорости v достигаются по направлению истечения струи. Чтобы вращение захватило весь слой жидкости в окрестности дна (до расстояния не менее 10 см), необходимо, чтобы струя в соответствии с уравнением (6) охватила весь радиус цилиндра. Это произойдет, когда число «оборотов» струи N составит

$$N \sim 1/\pi \operatorname{tg} \alpha$$

или порядка 15.

Обозначим среднюю скорость истечения через $(U_x)_{\text{ср}}$. Тогда среднее значение угловой скорости ω составляет

$$\omega = 2(U_x)_{\text{ср}} / R (\text{с}^{-1}). \quad (8)$$

Следовательно, минимальное время T_3 необходимой закрутки потока в окрестности дна составляет:

$$T_3 = N / \omega = R / 2\pi (U_x)_{\text{ср}} \operatorname{tg} \alpha. \quad (9)$$

В частности, при радиусе 700 мм и средней скорости истечения 100 мм/с мы получим для минимального времени закрутки значение порядка 1 мин.

Реальное время закрутки может быть больше из-за того, что в использованном решении не учтено влияние пристеночных эффектов.

Выполненный анализ математической модели закрученного движения жидкости у неподвижного дна круглого резервуара (у поверхности загрузки медленного фильтра) дает основание надеяться на успех в конструировании системы регенерации медленного пленочного фильтра с легкоподвижной массой гидроокиси алюминия (железа) с использованием в качестве «привода» направленного потока рабочей жидкости.

Как показало проведенное исследование, в нашем случае необходим ламинарный режим раскручивания придонного объема жидкости до определенной скорости и на определенное время, достаточных для сдвига отложений и перемещения их в центр цилиндрического сосуда. Приведенные теоретические решения дают примерные значения указанных параметров, которые должны быть уточнены экспериментально.

После выполнения задачи концентрирования сдвинутого осадка в центре цилиндрического фильтра должны последовать: остановка внешнего раскручивающего воздействия; последующий выпуск осадка за пределы фильтра (под гидростатическим давлением или насосом).

При использовании полученных рекомендаций для реализации процесса сбора и удаления легко-подвижного осадка следует учесть конструктивные особенности открытых гидроциклонов и принимать во внимание отличия в режимах гидроциклонов и устройств для раскручивания жидкости.

Открытые гидроциклоны относятся к сооружениям гравитационного типа с вращательным движением потока в рабочей зоне, которое обеспечивается тангенциальным подводом осветляемой воды к цилиндрическому корпусу. Число впускных патрубков принимается обычно не менее двух. Скорость впуска воды в гидроциклон составляет 0,1–0,5 м/с, то есть выше, чем по нашим оценкам. Осадок из конической части открытых гидроциклонов удаляют откачкой насосами, гидроэлеваторами или под гидростатическим давлением воды. Вращение потока способствует агломерации взвешенных частиц и увеличению их гидравлической крупности.

Интенсификация процесса разделения в гидроциклоне достигается за счет уменьшения высоты слоя отстаивания, чтоозвучно нашей задаче раскручивания тонкого слоя надзагруженного объема жидкости.

В качестве ориентировочных расчетных параметров могут быть приняты следующие: диаметр аппарата рекомендуется принимать не более 4 м; скорость восходящего потока в аван-

камере принимают $0,5 \text{ м/с}$; удельная гидравлическая нагрузка $q, \text{ м}^3/(\text{м}^2\text{ч})$, которая определяется по формуле

$$q = 3,6K \frac{D^2 - (d + 2b)^2}{D^2} u_0 n \eta, \quad (10)$$

где $3,6$ – коэффициент перевода мм/с в м/ч ; u_0 – гидравлическая крупность задерживаемых частиц, мм/с ; K принимается равным 1 . Среднее значение коэффициента η при рабочей нагрузке $2,0\text{--}2,5 \text{ м}^3/\text{м}^2$ равно $0,75$; n – число ярусов.

Этим приближенным расчетом можно пользоваться при гидравлической нагрузке на один ярус высотой примерно $0,25 \text{ м}$ в пределах $1 : 2,5 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$.

При диаметре медленного фильтра $4,0 \text{ м}$ $F = 12,56 \text{ м}^2$.

Для аппарата такой площади потребуется подача жидкости расходом Q_n :

$$Q_n = 12,56 \text{ м}^2 \cdot 2,0 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч} = 25,12 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Насос с таким расходом и напором порядка $5,0 \text{ м в. ст.}$ может быть установлен в центре фильтра над загрузкой.

Тангенциальная подача рабочей жидкости по двум или четырем патрубкам вдоль внутренней поверхности стенок фильтра и отбор воды насосом в центре фильтра обеспечат необходимый гидродинамический режим вращающегося потока жидкости и ускорят при одних и тех же затратах энергии сбор осадка в центре фильтра. После раскручивания жидкости и сдвига осадка напорный патрубок насоса может быть переключен на выброс собранного осадка на иловую площадку.

Проведение экспериментальных исследований и развитие теории (в плане уточнения численных значений критериев) в этом направлении являются, по нашему мнению, интересной и актуальной задачей.

Методу математического моделирования процесса «сухого» фильтрования будет посвящено второе сообщение, которое будет опубликовано в следующем номере «Ученых записок ПетрГУ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аюкаев Р. Р. Технология медленного фильтрования на сооружениях малой и средней производительности: Дисс. ... канд. технич. наук. Самара: СГАСА, 2006. 170 с.
2. Графова Е. О. Повышение эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения загородных объектов: Дисс. ... канд. технич. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2008. 148 с.
3. Коренев Ю. И. Водовоздушная промывка скорых фильтров передвижной воздухораспределительной системой: Автореф. дисс. ... канд. технич. наук. Киев: Киевский инж.-стр. инст., 1985. 16 с.
4. Коchin Н. Е., Кибелль И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Физматгиз, 1963. 665 с.
5. Ландау Л. Д., Лишниц Е. М. Гидродинамика. М.: Наука, 1986. 736 с.
6. Порядин А. Ф. Водозаборы в системах централизованного водоснабжения. М.: Изд-во НУМЦ Госкомэкологии России, 1999. 338 с.
7. Шехтман Ю. М. Фильтрация малоконцентрированных суспензий // Изв. АН СССР. 1949. № 3. 260 с.
8. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.