

УДК 628.3

**РОМАН РЕНАТОВИЧ АЮКАЕВ**

кандидат технических наук, инженер ООО «Коммунжил-проектинвест»

*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 скорых 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 скорого 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 (отмывки) 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 гидроксида 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].

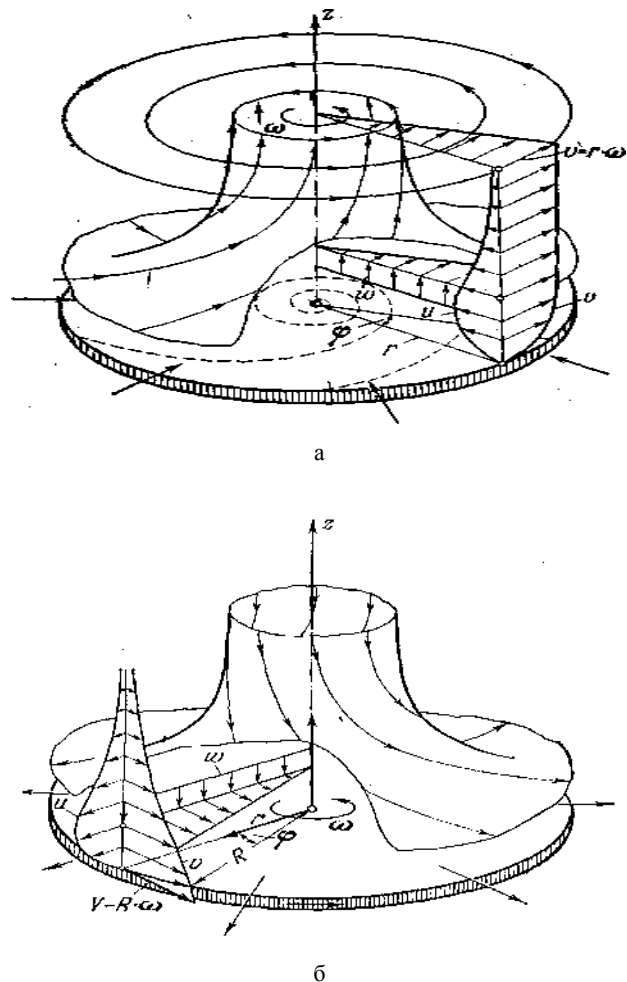


Рис. 1. Графическое изображение результатов математического моделирования процесса регенерации медленного фильтра: а – течение в окрестности диска (скребка), вращающегося в покоящейся жидкости; б – вращательное движение жидкости над неподвижным основанием (над поверхностью загрузки)

**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, входящих вблизи дна, окружная скорость вследствие торможения понижена, поэтому здесь цен-

требная 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  $\omega$ . 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,  $r = 0$ ,  $\phi$  – угловая координата,  $z$  – вертикальная координата ( $z = 0$  – твердая стенка).

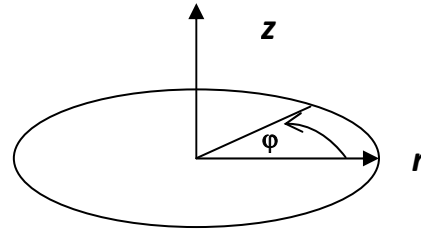


Рис. 2. Цилиндрическая система координат

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

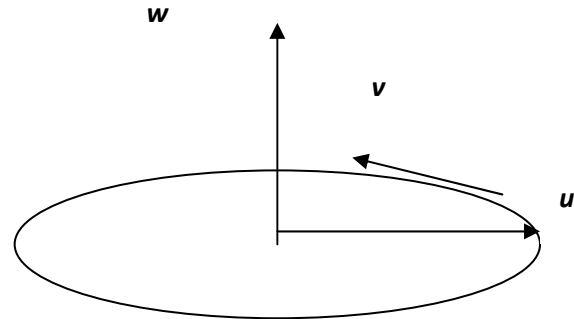


Рис. 3. Направления скоростей  $w$ ,  $v$ ,  $u$

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

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

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

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

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

Граничные условия:

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

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

$$(1/\rho) \hat{q}p/\hat{r} = v^2/r.$$

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

$$v = r\omega,$$

получим для градиента давления выражение:

$$\partial p / \partial r = \rho r \omega^2. \quad (3)$$

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

$$Z_{нов} = Ar^2, \quad (4)$$

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

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

Отметим, что по перепаду высот жидкости можно определить угловую скорость вращения («закрутки»)  $\omega$  слоя жидкости. Для этого надо измерить перепад высот поверхности между центром вращения (положим  $Z_{нов} = 0$  при  $r = 0$ ) и половиной радиуса цилиндра, в котором вращается жидкость ( $Z_{нов} = Z_{0,5}$  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).

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

$$\zeta = z (\omega / \nu)^{0,5},$$

а также безразмерные скорости

$$U(\zeta) = u/(r\omega), \quad V(\zeta) = v/(r\omega), \quad W(\zeta) = w/(r\omega)^{0,5}.$$

В безразмерных переменных граничные условия (2) примут вид:

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

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.

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

$\zeta$	$U$	$V$	$W$	$\zeta$	$U$	$V$	$W$	$\zeta$	$U$	$V$	$W$
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	$\infty$	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  $\nu = 0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ , 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  $0,5 \text{ мм/с}$  и меньше могут

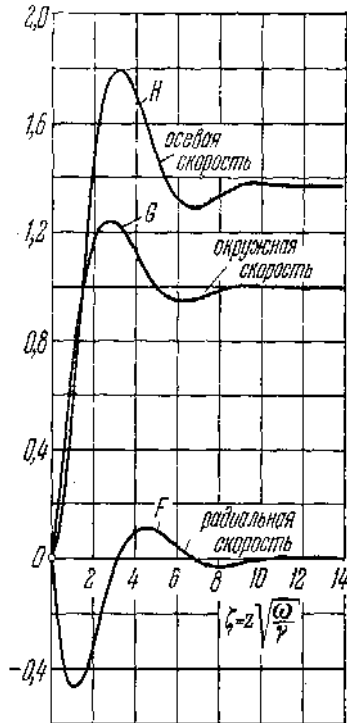


Рис. 4. Распределение скорости в пограничном слое, образующемся при вращении жидкости вблизи неподвижного основания

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  $z \leq 3(\omega/\nu)^{0.5}$ , 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.

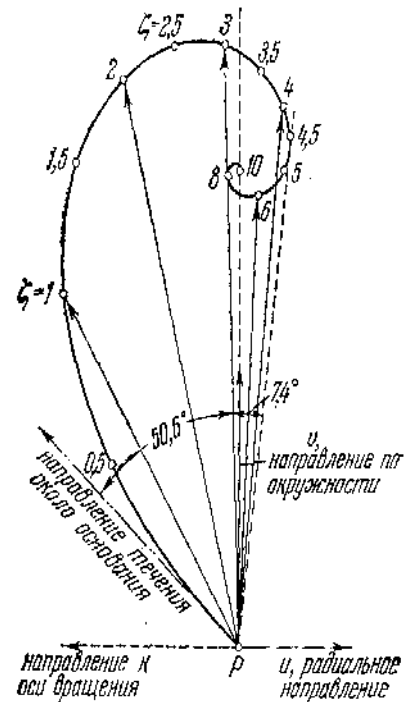


Рис. 5. Векторная диаграмма горизонтальной составляющей скорости в пограничном слое, образующемся при вращении жидкости вблизи неподвижного основания

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:

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

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

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

где  $\omega$  измеряется в  $\text{с}^{-1}$ , а  $R$  – в см. Для радиуса фильтра порядка 70 см критическая область лежит в области  $\omega > 0,04 \text{ с}^{-1}$ . 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 трубки 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 раскрутки всего объема жидкости следует учесть, что вследствие наличия стенки максимальные окружные скорости  $v$  достигаются по направлению истечения струи. Чтобы вращениехватило 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  $\omega$  составляет

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

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

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

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 легкоподвижного 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, что созвучно нашей задаче раскручивания тонкого слоя надзагрузочного 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  $q$ ,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ , 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  $\text{мм/с}$  в  $\text{м/ч}$ ;  $u_0$  – гидравлическая крупность задерживаемых частиц,  $\text{мм/с}$ ;  $K$  принимается равным 1. Среднее значение коэффициента  $\eta$  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  $1 : 2,5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ .

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

Для аппарата такой площади потребуется подача жидкости расходом  $Q_n$ :

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

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. техн. наук. Самара: СГАСА, 2006. 170 с.
2. Графова Е. О. Повышение эффективности работы систем водоснабжения и водоотведения загородных объектов: Дисс. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГАСУ, 2008. 148 с.
3. Корнев Ю. И. Водовоздушная промывка скорых фильтров передвижной воздухораспределительной системой: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Киев: Киевский инж.-стр. инст., 1985. 16 с.
4. Кочин Н. Е., Кибель И. А., Розе Н. В. Теоретическая гидромеханика. Ч. 2. М.: Физматгиз, 1963. 665 с.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц 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.