

## ОСОБЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В РАБОЧИХ ЗОНАХ НЕПОЛНОПОТОЧНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ФИЛЬТРОВ С ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕРФОРИРОВАННОЙ ПЕРЕГОРОДКОЙ

В.А. Девисилов

devisilov@bmstu.ru

В.А. Львов

lvov@bmstu.ru

А.В. Фатова

fatova\_alvina@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты исследования особенностей движения твердых частиц в неполнопоточных гидродинамических фильтрах с вращающейся перфорированной перегородкой, а также результаты компьютерного моделирования потоков жидкости в рабочих зонах фильтров. Определены осредненные значения тангенциальной, радиальной и осевой составляющих скоростей движения в зависимости от радиуса устройства. Доказана обоснованность применения цилиндрической формы стенки фильтров. Установлено наличие малонапорного и напорного режимов реализации очистки жидкостей в рассматриваемых фильтрах. В малонапорном режиме выявлены особенности движения твердых частиц, которые характерны для центрифуг, а в напорном — для гидроциклонов малых размеров. Приведена методика получения осредненных детерминированных характеристик, составляющих скорости потока жидкости как по высоте, азимуту, так и по радиусу в рабочих зонах гидродинамического фильтра. Приведены количественные оценки осредненных составляющих скорости движения жидкости. По сравнению с тангенциальной составляющей осевая составляющая скорости меньше на порядок, а радиальная составляющая — на два порядка. Выявлено, что в конструкциях таких гидродинамических фильтров реализуется четырехступенчатая система очистки жидкостей. Отмечено, что для частиц размером менее 40 мкм в уравнениях переноса наряду с детерминированными составляющими необходимо учитывать и случайные составляющие протекающих процессов

### Ключевые слова

*Численное моделирование, вихревые структуры, гидродинамический фильтр, гидродинамическая очистка жидкости, вращающийся фильтроэлемент, многоступенчатая очистка жидкостей*

Поступила 28.03.2022

Принята 18.04.2022

© Автор(ы), 2022

**Введение.** В современных производственных и технологических процессах качество и промышленная чистота рабочих жидкостей многих гидравлических систем зачастую имеют определяющее значение [1–3] и жестко регламентируются<sup>1</sup>. Для обеспечения многих нормируемых показателей обычно используют фильтры тонкой и грубой очистки [4, 5], имеющие в своем составе фильтроэлементы<sup>2</sup>, гарантирующие выполнение требований по фракционному составу примесей, абсолютной или номинальной тонкости очистки. Однако применяемые в настоящее время фильтроэлементы очень чувствительны к залповым выбросам загрязнений и нарушениям работы оборудования предварительных ступеней очистки, что может приводить к возникновению внезапных, непрогнозируемых отказов гидравлических систем в целом.

Для устранения указанных проблем применяют комбинированные способы очистки жидкостей, сочетающие предварительную очистку в различных силовых полях с процессами фильтрования [6, 7]. Среди них имеются гидродинамические фильтры, в которых на предварительной стадии очистки используются центробежные силовые поля потоков жидкости в рамках одного устройства [8–11].

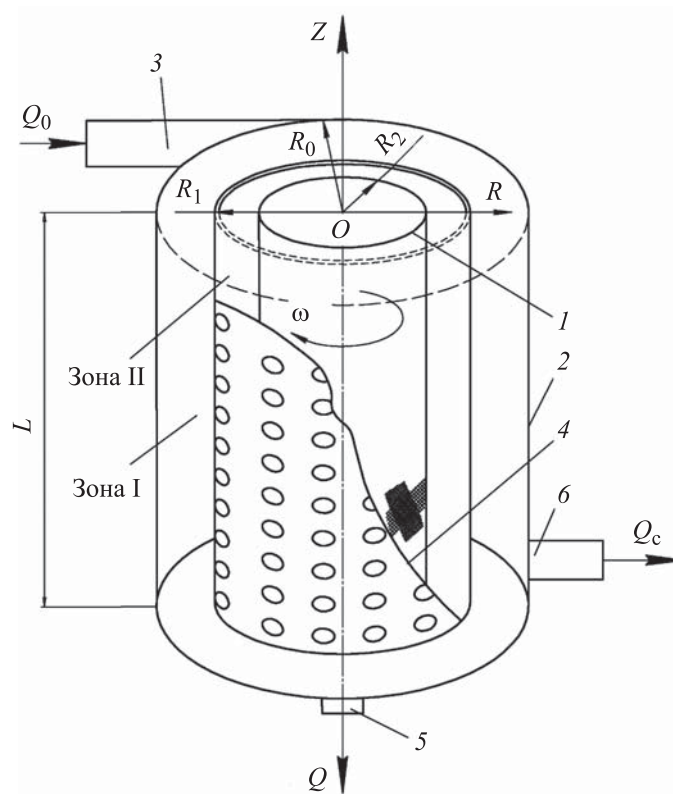
Необходимо выделить неполнопоточные гидродинамические фильтры с вращающейся перфорированной перегородкой [12], реализующие управляемые процессы предварительной многоступенчатой очистки жидкостей в рабочих зонах устройства (рис. 1).

Независимо от способа вращения фильтроэлемента поток очищаемой жидкости с твердыми частицами максимального размера  $d_{\max ч}$  через входной патрубок тангенциально вводится в корпус фильтра и попадает в зону I тангенциального ввода очищаемой жидкости, расположенную между вращающейся перфорированной перегородкой и внутренней стенкой корпуса, где происходит предварительная очистка жидкости. Далее частично очищенная жидкость с пониженной концентрацией загрязнений через перфорацию с эквивалентным размером проходных каналов  $d_k \gg d_{\max ч}$  и просветом  $\Phi$  вращающейся перегородки поступает в защитную зону II, расположенную между перфорированной перегородкой и фильтроэлементом, которые вращаются с угловой скоростью  $\omega$ . В зоне II процесс предварительной очистки жидкости продолжается.

---

<sup>1</sup> ГОСТ 17216–2001. Чистота промышленная. Классы чистоты жидкостей. М., Изд-во стандартов, 2003.

<sup>2</sup> ГОСТ 26070–83. Фильтры и сепараторы для жидкости. Термины и определения. М., Изд-во стандартов, 1983.



**Рис. 1.** Упрощенная схема неполнопоточного гидродинамического фильтра с дополнительной вращающейся перфорированной перегородкой:

1 — вращающийся фильтроэлемент; 2 — корпус; 3 — входной патрубок; 4 — вращающаяся перфорированная перегородка; 5 — патрубок вывода очищенной жидкости; 6 — сбросной патрубок

Предварительно очищенная жидкость после прохождения защитной зоны попадает на фильтроэлемент с пористостью II и средним размером пор  $d_{II} \ll d_k$ , в котором происходит окончательная очистка жидкости. Очищенная жидкость выводится через патрубок вывода жидкости. Загрязнения, уловленные в зонах I и II, выводятся в нижней части корпуса фильтра через сбросной патрубок.

Особое внимание к подобным гидродинамическим фильтрам обусловлено их возможностью не только выполнять функции концентратора и классификатора загрязнений, но и обеспечивать существенное увеличение ресурсных характеристик применяемых фильтроэлементов [13].

Однако существующие методики расчета [14] предварительной очистки жидкостей таких гидродинамических фильтров от твердых частиц размером менее 40 мкм носят ограниченный характер, поскольку не учиты-

вают многих факторов, обусловленных структурой их гидродинамических потоков в рабочих зонах устройств.

В общем случае описание движения твердых частиц в рабочих зонах фильтров строится на основе общей системы уравнений переноса, в которых учтены как протекающие гидродинамические процессы в целом, так и гидродинамика поведения единичных включений твердых частиц в рамках элементарного переноса. Соответственно, системы уравнений, описывающие частные виды переноса, получают из общей системы уравнений путем введения того или иного набора дополнительных осредненных параметров, которые характеризуют конкретную гидродинамическую обстановку с учетом условий однозначности и особенностей поведения твердых частиц.

В результате исследование осредненных гидродинамических составляющих скоростей потоков жидкости и их влияние на движение твердых частиц в рабочих зонах гидродинамических фильтров следует отнести к актуальным и практически значимым задачам.

Для описания движения твердых частиц в криволинейных потоках широкое распространение получила следующая форма уравнения движения [15, 16]:

$$m_{\text{ч}} \frac{d\vec{v}_{\text{с}}}{dt} + \frac{\pi d_{\text{ч}}^3}{6} (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{с}}) \vec{\omega} \times (\vec{\omega} \times \vec{R}) + m_{\text{ч}} \left( \frac{d\vec{\omega}}{dt} \times \vec{R} \right) + 2m_{\text{ч}} (\vec{\omega} \times \vec{v}_{\text{с}}) + \Sigma = -3\pi\mu d_{\text{ч}} \vec{v}_{\text{с}}, \quad (1)$$

где  $t$  — время;  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $\rho_{\text{с}}$  — плотности твердых частиц и среды;  $R$  — текущий радиус вращения (расстояние от оси устройства);  $\omega$  — угловая скорость вращения;  $\mu$  — динамическая вязкость среды;  $\Sigma$  — прочие силы, включая нестационарные и случайные составляющие всех сил.

Вместе с тем использование уравнения (1) в практике инженерных расчетов может вызвать значительные затруднения, что требует введения в рассмотрение ряда обоснованных допущений [15, 16]. Применительно к гидродинамическим фильтрам в рамках приближения Стокса в уравнении (1) можно оставить лишь слагаемые, характеризующие центробежную силу (с учетом вытеснения частицей соответствующего объема жидкости) и силу внешнего сопротивления.

Подобные допущения не вносят существенных погрешностей в расчет движения твердых частиц размером менее 100 мкм в различных потоках жидкости [16, 17].

При определении границ применимости приближения Стокса к закрученным потокам могут возникать значительные погрешности. Предельные размеры частиц, для которых допустимо использование приближения Стокса, при центробежном осаждении в  $\sqrt[3]{Fr'}$  раз ( $Fr'$  — число Фруда) меньше, чем при гравитационном [18]. При значениях фактора разделения  $Fr' = 50-300$  для значений числа Рейнольдса  $Re_d < 1,5$  предельные размеры стоксовых частиц в процессах гравитационного осаждения не превышают 160 мкм, в то время как в гидродинамических процессах центробежной очистки жидкости они составляют 25...45 мкм. Это позволяет записать уравнение для радиального движения твердых частиц в виде

$$u = \frac{d_q^2}{18\mu}(\rho_q - \rho_c)\omega^2(R)R - u', \quad (2)$$

где  $u' = u'(Q, R)$  — среднее значение радиальной составляющей скорости движения жидкости.

Как правило, в уравнении (2) параметр  $\omega(R)$  определяют, исходя из поля скоростей тангенциальной составляющей скорости потока жидкости, используя степенную зависимость [19]:

$$w'R^n = \text{const}, \quad (3)$$

где  $w'$  — тангенциальная составляющая скорости потока на радиусе  $R$ ;  $n$  — постоянный показатель, который обычно изменяется в пределах от -1,2 до -1.

Характерно, что в процессах центробежной очистки тангенциальные скорости твердых частиц близки к тангенциальным составляющим скорости потока жидкости, а расхождения между ними не превышают 5 % [16].

При определении входящей в уравнение (2) радиальной составляющей скорости движения жидкости, которая характеризует классификационное воздействие потока жидкости на твердые частицы, наибольшее распространение получило выражение [16]:

$$u'(R) = \frac{k_r Q}{2\pi R L_0}, \quad (4)$$

где  $k_r$  — некоторый коэффициент;  $Q$  — объемный расход жидкости через устройство;  $L_0$  — высота рабочей зоны.

Учитывая постоянное присутствие циркуляционных контуров в рабочих зонах гидродинамических фильтров с вращающейся перфорированной перегородкой, можно записать следующее выражение:

$$u'(R) = \frac{k_r Q}{2\pi R^l L_0}, \quad (5)$$

где индекс  $l$  — некоторый постоянный коэффициент.

В закрученных потоках радиальная составляющая скорости движения жидкости примерно на два порядка меньше ее тангенциальной составляющей [16]. Вместе с тем для твердых частиц малых размеров действие центробежных сил, обусловленных тангенциальной составляющей скорости потока, оказывается сопоставимым с классификационным действием радиальной составляющей скорости потоков.

*Цель работы* — выявление особенностей движения твердых частиц в неполнопоточных гидродинамических фильтрах с вращающейся перфорированной перегородкой на основе анализа гидродинамики потоков жидкости в их рабочих зонах.

**Метод исследования.** Исследование гидродинамики потоков жидкости в рабочих зонах гидродинамических фильтров осуществлялось на основе численного моделирования с помощью решений уравнений Навье — Стокса с применением пакета прикладных программ ANSYS CFX. Исходно определяли профили тангенциальной  $w_\theta$ , осевой  $w_z$  и радиальной  $u'$  составляющих скорости потока жидкости в различных сечениях по высоте  $h$ , радиусу  $R$  и азимуту  $\varphi$  рабочих зон гидродинамических фильтров.

Осредненные количественные характеристики для составляющих скоростей потока жидкости определяли на заданной высоте  $h$  при различных азимутах  $\varphi$ , не менее чем в восьми сечениях рабочих зон. После чего в каждом сечении на соответствующем расчетном радиусе гидродинамического фильтра усредняли полученные результаты, определяя соответствующие статистические характеристики. Таким образом, получены необходимые осредненные характеристики составляющих скоростей потока жидкости на соответствующей высоте устройства.

При необходимости на основе методов математической статистики операция усреднения выполнялась далее для соответствующих составляющих скоростей потока жидкости по высоте рабочих зон гидродинамических фильтров. В результате получены осредненные характеристики составляющих скорости потока жидкости в пространстве рабочих зон и областей устройства.

Параметры и характеристики, используемые в качестве условий однозначности процесса моделирования приведены в таблице, где  $\delta_1$  — толщина вращающейся перфорированной перегородки;  $\delta_2$  — толщина фильтроэлемента;  $\Pi$  — пористость фильтроэлемента;  $d_k$  — эквивалент-

ный размер каналов перфорации перегородки;  $d_{\text{п}}$  — средний размер пор фильтроэлемента;  $d_{\text{в}}$ ,  $d_{\text{вх}}$  и  $d_{\text{с}}$  — гидравлические диаметры выходного, входного и сбросного патрубков фильтра;  $\Phi$  — просвет перфорации вращающейся перегородки. В качестве модельной жидкости использовалась вода в диапазоне значений температуры  $T = 20 \dots 30$  °С.

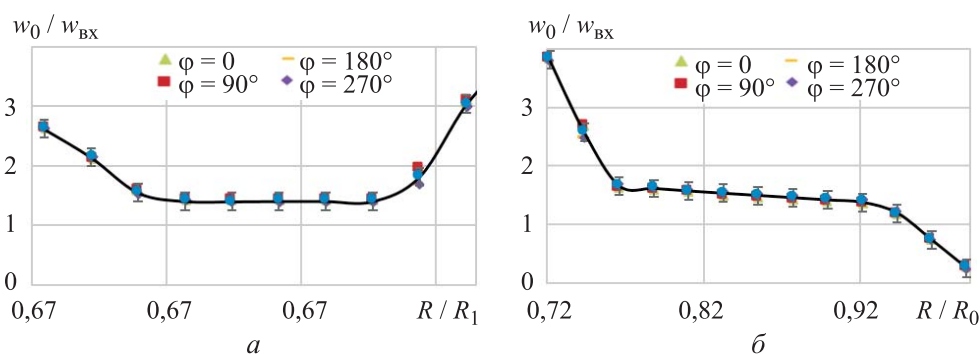
**Параметры и характеристики, используемые в качестве условия однозначности процессов моделирования**

Параметр	Диапазон изменения	Параметр	Диапазон изменения
<i>Конструктивные параметры</i>			
$L_0$ , м	$134 \cdot 10^{-3} - 149 \cdot 10^{-3}$	$L$ , м	$150 \cdot 10^{-3} - 160 \cdot 10^{-3}$
$R_0$ , м	$40 \cdot 10^{-3} - 50 \cdot 10^{-3}$	$R_1$ , м	$28,5 \cdot 10^{-3} - 34,5 \cdot 10^{-3}$
$R_2$ , м	$15 \cdot 10^{-3} - 25 \cdot 10^{-3}$	$d_{\text{п}}$ , м	$5 \cdot 10^{-6} - 100 \cdot 10^{-6}$
$\delta_1$ , м	$3 \cdot 10^{-3} - 4 \cdot 10^{-3}$	$d_{\text{в}}$ , м	10 · 10 <sup>-3</sup> –28 · 10 <sup>-3</sup>
$\delta_2$ , м	$1 \cdot 10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}$	$d_{\text{вх}}$ , м	
$d_{\text{к}}$ , м	$3 \cdot 10^{-3} - 8 \cdot 10^{-3}$	$d_{\text{с}}$ , м	
$\Pi$ , %	20–50	$\Phi$ , %	3–23
<i>Расходные и технологические характеристики</i>			
$Q_0$ , м <sup>3</sup> /с	$3,14 \cdot 10^{-6} - 1,7 \cdot 10^{-3}$	$Q_{\text{с}}$ , м <sup>3</sup> /с	$3,14 \cdot 10^{-7} - 2,5 \cdot 10^{-3}$
$\omega$ , рад/с	10,5–335		

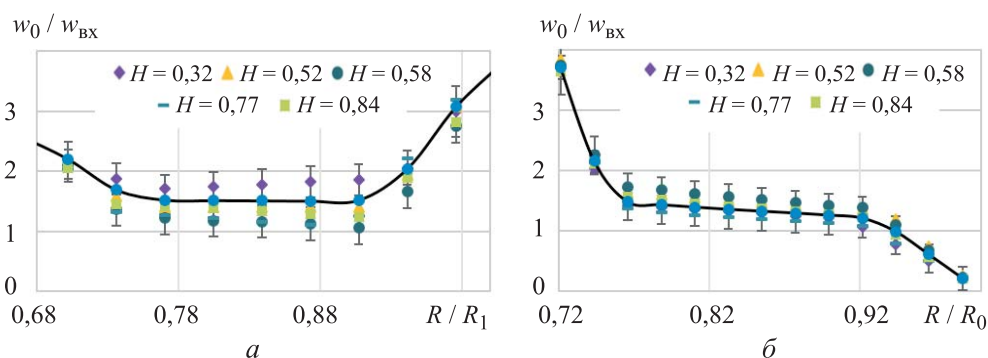
**Результаты исследования и обсуждение.** Изменения осредненного профиля тангенциальной составляющей скорости потока жидкости  $w_0$  в рабочих зонах гидродинамических фильтров относительно средней скорости на входе в устройство  $w_{\text{вх}}$  в зависимости от его параметров приведены на рис. 2 и 3.

Полученные результаты позволили подтвердить обоснованность допущений об исключении из рассмотрения краевых эффектов и выявить практическое постоянство этой составляющей по высоте вращающейся перфорированной перегородки, что указывает не только на ее стабилизирующее действие, но и на обоснованность применения цилиндрической формы стенки фильтров. Кроме того, оценку показателя степени  $n$ , входящего в уравнение (3), следует определять без учета влияния пограничных слоев жидкости.

Установлено, что в зависимости от зазора  $\Delta_I = R_0 - R_1$  зоны тангенциального ввода в гидродинамических фильтрах, свойств очищаемой жидкости  $\rho_{\text{с}}$  и  $\mu$ , а также скоростей потоков  $w_{\text{вх}}$  и  $w'_0$  реализуется два основных режима работы. Условно их можно назвать малонапорным и напорным (рис. 4).



**Рис. 2.** Зависимость осредненного профиля относительной тангенциальной составляющей скорости потока жидкости  $w_0/w_{BX}$  гидродинамического фильтра от относительного радиуса  $R/R_0$  устройства при относительной высоте  $H = h/L = 0,52$  для различных значений азимута  $\varphi$  в защитной зоне II (а) и зоне I тангенциального ввода (б)

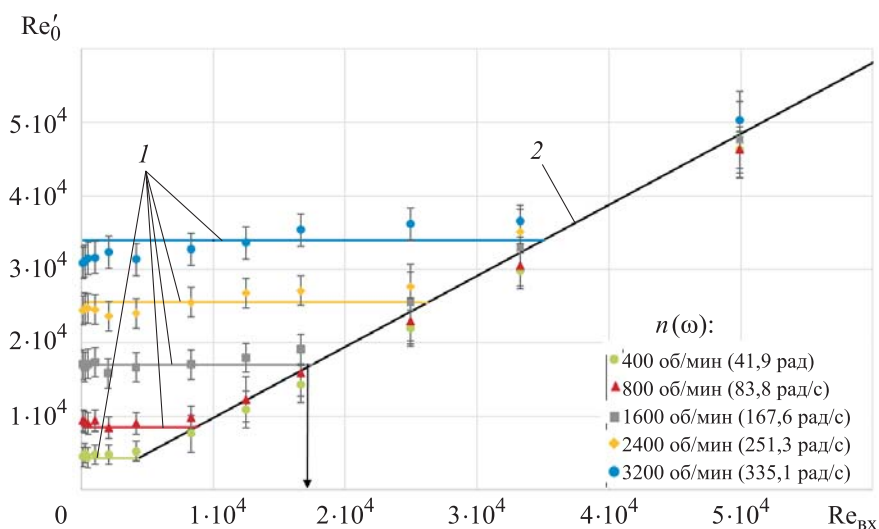


**Рис. 3.** Зависимость осредненного профиля относительной тангенциальной составляющей скорости потока жидкости  $w_0/w_{BX}$  гидродинамического фильтра в различных сечениях по его относительной высоте  $H = h/L$  и относительному радиусу  $R/R_0$  в защитной зоне II (а) и в зоне I тангенциального ввода (б)

Проведенные исследования показали, что в части центробежного воздействия на твердые частицы входные конструкции гидродинамических фильтров имеют преимущество по сравнению с аналогичными конструкциями гидроциклонов-классификаторов, которое наиболее ярко проявляется в режиме малонапорного течения.

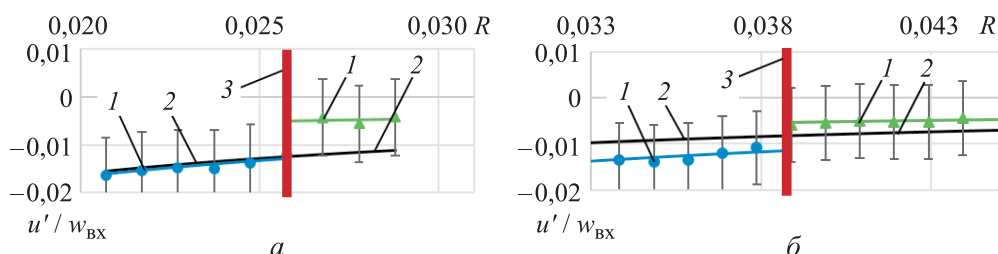
В результате тангенциальную составляющую скорости потока жидкости в системе уравнений переноса можно рассматривать в качестве детерминированной составляющей, которая определяет центробежное воздействие потоков жидкости на твердые частицы. При этом пограничные слои жидкости можно рассматривать в качестве транспортных каналов удаления твердых частиц из рабочих зон фильтров.





**Рис. 4.** Взаимозависимость чисел Рейнольдса  $Re_{вх} = w_{вх} \Delta l \rho_c / \mu$  на входе гидродинамического фильтра и  $Re'_0 = w'_0 \Delta l \rho_c / \mu$  на границе пограничного слоя для малонапорного (1) и напорного (2) режимов

Результаты исследований радиальной составляющей, которая определяет интенсивность классификационных воздействий на твердые частицы, позволили подтвердить обоснованность применения функциональной зависимости (5) (рис. 5).



**Рис. 5.** Зависимость осредненного профиля относительной радиальной составляющей скорости потока жидкости  $u' / w_{вх}$  в различных сечениях гидродинамического фильтра от его радиуса  $R$  в защитной зоне II и зоне I тангенциального ввода:

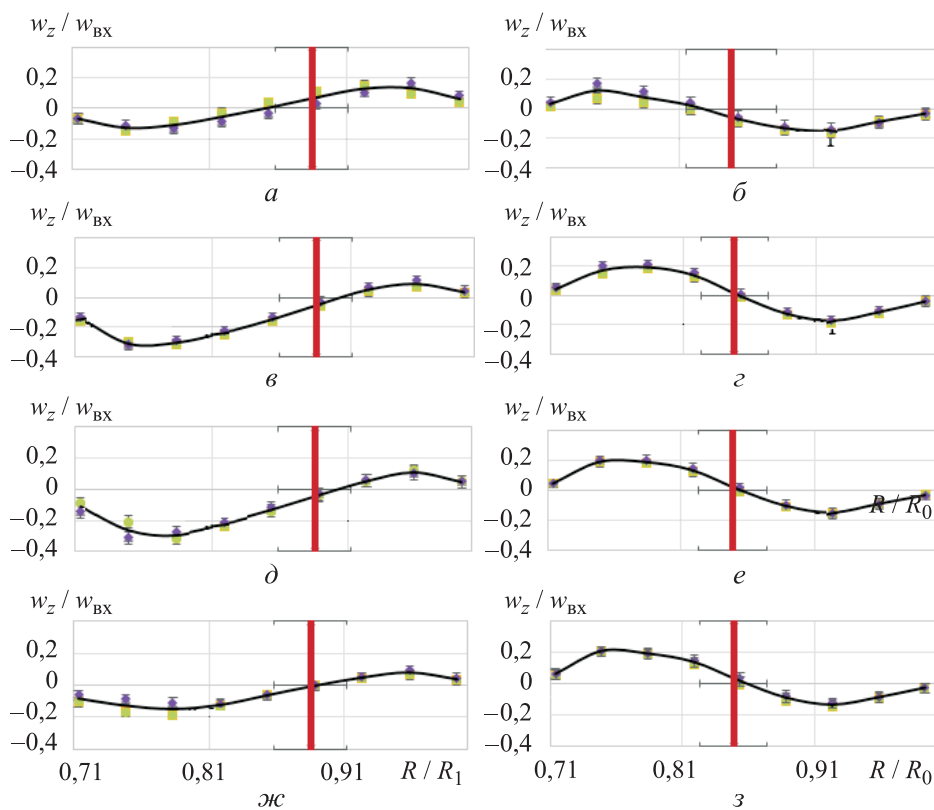
1 — уравнение (5); 2 — уравнение (4); 3 — оболочка нулевой осевой скорости ( $w_z = 0$ )

Выявлено, что радиальная составляющая скорости движения жидкости в рабочих зонах гидродинамических фильтров оказывается более чем на два порядка меньше ее тангенциальной составляющей. Установлено, что локальные значения радиальной составляющей могут принимать как положительные, так и отрицательные значения, а коэффициент вариации

ции относительного отношения  $u'/w_{\text{вх}}$  может существенно превышать единицу. При этом оценки, выполненные с использованием (4) и (5), следует признать равнозначными.

Отметим, что для твердых частиц размером менее 40 мкм влияние радиальной составляющей скорости движения жидкости необходимо учитывать в составе как детерминированных, так и случайных составляющих протекающих процессов.

В результате анализа осевой составляющей скорости потока жидкости в рабочих зонах гидродинамических фильтров выявили наличие цилиндрических оболочек нулевой осевой скорости потоков жидкости  $w_z = 0$ , разделяющих области нисходящих и восходящих потоков (рис. 6). Указанные области могут рассматриваться в качестве самостоятельных ступеней очистки. При этом граничные значения безразмерных координат всех



**Рис. 6.** Характерные зависимости  $w_z/w_{\text{вх}}$  в разных сечениях по относительной высоте  $H = h/L$  для различных значений азимута  $\varphi$  и относительного радиуса  $R/R_0$  в защитной зоне II при  $H = 0,77$  (а);  $0,52$  (б);  $0,39$  (в);  $0,19$  (з) и в зоне I тангенциального ввода при  $H = 0,77$  (д);  $0,52$  (е);  $0,39$  (ж);  $0,19$  (з)

ступеней очистки остаются практически постоянными, независимо от высоты рассматриваемого сечения.

Установлено, что осевая составляющая скорости потока жидкости оказывается на порядок меньше ее тангенциальной составляющей и на порядок больше ее радиальной составляющей. При этом интенсивности циркуляционных потоков в зоне тангенциального ввода составляют 35 %, а в защитной зоне — ~ 25 % объемной пропускной способности гидродинамических фильтров, что не противоречит аналогичным оценкам для гидроциклонов [16].

В результате осевую составляющую скорости движения жидкости можно рассматривать в качестве случайных составляющих протекающих процессов переноса.

Следовательно, можно сделать вывод, что в подобных конструкциях гидродинамических фильтров реализуется четырехступенчатая система предварительной очистки жидкостей.

**Выводы и рекомендации.** В рассматриваемых неполнопоточных гидродинамических фильтрах с вращающейся перфорированной перегородкой реализуется два режима работы гидродинамических фильтров: малонапорный и напорный. В первом выявлены особенности движения твердых частиц, характерные для центрифуг, во втором — для гидроциклонов малых размеров. Доказана обоснованность применения цилиндрической формы стенки фильтров.

Установлено, что в рабочих зонах гидродинамических фильтров на всех исследуемых режимах работы постоянно присутствуют области нисходящих и восходящих потоков жидкостей, оказывающих соответствующее влияние на движение твердых частиц. Указанные области можно рассматривать в качестве самостоятельных ступеней очистки жидкостей от твердых частиц.

В предлагаемых конструкциях гидродинамических фильтров реализована четырехступенчатая система очистки жидкостей. При этом для твердых частиц размером менее 40 мкм в уравнениях переноса наряду с детерминированными составляющими необходимо учитывать случайные составляющие протекающих процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Белянин П.Н., Данилов В.М. Промышленная чистота машин. М., Машиностроение, 1982.
- [2] Пискунов М.А. Чистота гидравлического масла в гидравлических системах харвестеров и форвардеров. *ЛесПромИнформ*, 2015, № 4, с. 66–72.

- [3] Шевченко Г.А., Кривцова Н.И. Влияние сернистых соединений на смазывающую способность дизельных топлив. *Вестник Томского государственного университета. Химия*, 2015, № 2, с. 45–58.
- [4] Хисматуллин А.С., Баширов М.Г., Солдатова Е.Г. и др. Повышение эффективности охлаждения маслонеполненных трансформаторов. *Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки*, 2018, т. 24, № 1, с. 38–49.  
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.240104>
- [5] Булат А.В., Карелина С.А., Ивановский В.Н. и др. Рациональные области применения различных видов оборудования для защиты от механических примесей. *Территория «НЕФТЕГАЗ»*, 2020, № 9-10, с. 52–63.
- [6] Кича Г.П., Семенюк Л.А. Полнопоточная комбинированная фильтрацией и центрифугированием тонкая очистка моторного масла в судовых дизелях. *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология*, 2018, № 2, с. 62–69.  
DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-2-62-69>
- [7] Tarleton E.S. *Progress in filtration and separation*. Academic Press, 2014.
- [8] Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Гидродинамическое фильтрование. *Безопасность в техносфере*, 2015, т. 4, № 3, с. 68–80. DOI: <https://doi.org/10.12737/11885>
- [9] Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамическое вибрационное фильтрование и конструкции фильтров. *Безопасность жизнедеятельности*, 2004, № 7, с. 37–47.
- [10] Александров А.А., Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. и др. Влияние геометрических параметров рабочего канала гидродинамического фильтра с защитной перегородкой на структуру течения среды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2018, № 2 (77), с. 23–38.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-23-38>
- [11] Мочалин Е.В., Халатов А.А. Проблемы промышленной очистки жидкостей от механических примесей и применение ротационных фильтров. *Промышленная теплотехника*, 2009, т. 31, № 2, с. 19–30.
- [12] Девисилов В.А., Мягков И.А., Львов В.А. и др. Регенерируемый фильтр. Патент РФ 149 136 U1. Заявл. 04.08.2014, опубл. 20.12.2014.
- [13] Мягков И.А., Львов В.А., Беловолова А.Л. Исследование механизма центробежной сепарации в гидродинамическом вибрационном фильтре. *Сб. тр. VII Междунар. экологич. конгр.*, т. 6. Самара–Тольятти, 2019, с. 139–144.
- [14] Браженко В.М. Теоретическое исследование эффективности механической очистки жидкости ротационным фильтром. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*, 2017, т. 12 (28), № 2, с. 17–22.
- [15] Девисилов В.А., Мягков И.А., Львов В.А. и др. Аналитическая модель процесса разделения суспензий в гидродинамическом фильтре с вращающейся перфорированной перегородкой. *Безопасность в техносфере*, 2014, т. 3, № 5, с. 32–41.  
DOI: <https://doi.org/10.12737/6022>
- [16] Терновский И.Г., Кутепов А.М. *Гидроциклонирование*. М., Наука, 1994.

- [17] Протоdjяконов И.О., Люблинская И.Е., Рьжков А.Е. Гидродинамика и массо-обмен в дисперсных системах жидкость–твердое тело. Л., Химия, 1987.
- [18] Малиновская Т.А., Кобринский И.А., Кирсанов О.С. и др. Разделение суспензий в химической промышленности. М., Химия, 1983.
- [19] Александров А.А., Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Численное исследование течения жидкости между проницаемыми вращающимися цилиндрическими поверхностями. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 1 (88), с. 32–45. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-32-45>

**Девисилов Владимир Аркадьевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Львов Владимир Анатольевич** — старший преподаватель кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Фатова Альвина Викторовна** — аспирант кафедры «Экология и промышленная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Девисилов В.А., Львов В.А., Фатова А.В. Особенности движения твердых частиц в рабочих зонах неполнопоточных гидродинамических фильтров с вращающейся перфорированной перегородкой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 2 (141), с. 112–127.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-112-127>

**STUDY INTO SOLID PARTICLES MOVING IN THE WORKING AREAS OF PART-FLOW HYDRODYNAMIC FILTERS WITH A ROTATING PERFORATED BAFFLE**

V.A. Devisilov

V.A. Lvov

A.V. Fatova

[devisilov@bmstu.ru](mailto:devisilov@bmstu.ru)

[lvov@bmstu.ru](mailto:lvov@bmstu.ru)

[fatova\\_alvina@mail.ru](mailto:fatova_alvina@mail.ru)

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The purpose of the research was to consider solid particles moving in part-flow hydrodynamic filters with a rotating perforated baffle and simulate liquid flows in the working zones of filters. The paper introduces the results of the study. Within the research, we determined the averaged values of the tangential, radial and axial components

**Keywords**

*Numerical simulation, vortex structures, hydrodynamic filter, hydrodynamic liquid cleaning, rotating filter element, multi-stage liquid cleaning*

of the movement velocities depending on the radius of the device, confirmed the validity of using a cylindrical filter wall, and established the presence of low-pressure and pressure modes of liquid cleaning in the filters. We revealed that in the low-pressure mode solid particles move in a typical for centrifuges way, and in the pressure mode the particles movement is characteristic of that of small-sized hydrocyclones. The study introduces a technique for obtaining averaged deterministic characteristics that make up the liquid flow velocity in height, azimuth and radius in the working zones of a hydrodynamic filter and estimates the averaged components of the liquid velocity. Compared to the tangential component, the axial velocity component is one order of magnitude smaller, and the radial component, two orders of magnitude smaller. Findings of the research show that the designs of such hydrodynamic filters implement a four-stage liquid cleaning system and emphasize that in transport equations not only deterministic components but also random components of ongoing processes should be taken into account for particles smaller than 40  $\mu\text{m}$

Received 28.03.2022

Accepted 18.04.2022

© Author(s), 2022

---

## REFERENCES

- [1] Belyanin P.N., Danilov V.M. *Promyshlennaya chistota mashin* [Industrial cleanliness of machines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1982.
- [2] Piskunov M.A. Cleanliness of hydraulic oil in harvester and forwarder hydraulic systems. *LesPromInform*, 2015, no. 4, pp. 66–72 (in Russ.).
- [3] Shevchenko G.A., Krivtsova N.I. Vliyanie sernistykh soedinenij na smazyvaushchuyu sposobnost' dizel'nykh topliv. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Khimiya*, 2015, no. 2, pp. 45–58 (in Russ.).
- [4] Khismatullin A.S., Bashirov M.G., Soldatova E.G., et al. Increasing the efficiency of cooling in oil transformers. *Nauchno-tekhnicheskiy vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [St. Petersburg State Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2018, vol. 24, no. 1, pp. 38–49 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.240104>
- [5] Bulat A.V., Karelina S.A., Ivanovskiy V.N., et al. Rational applications of various types of equipment for protection from mechanical impurities. *Territoriya "NEFTEGAZ"* [Oil and Gas Territory], 2020, no. 9-10, pp. 52–63 (in Russ.).
- [6] Kicha G.P., Semenyuk L.A. Full-flow combined by filtration and by centrifugation thin cleaning of motor oil in ship diesels. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technology], 2018, no. 2, pp. 62–69 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2018-2-62-69>

- [7] Tarleton E.S. Progress in filtration and separation. Academic Press, 2014.
- [8] Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Hydrodynamic filtration. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2015, vol. 4, no. 3, pp. 68–80 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.12737/11885>
- [9] Devisilov V.A., Myagkov I.A. Hydrodynamic vibration filtration and filter designs. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*, 2004, no. 7, pp. 37–47 (in Russ.).
- [10] Aleksandrov A.A., Devisilov B.A., Sharay E.Yu., et al. Effect of geometric parameters of working channel of hydrodynamic filter with protective baffle on medium flow structure. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2018, no. 2 (77), pp. 23–38 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2018-2-23-38>
- [11] Mochalin E.B., Khalatov A.A. Problems of industrial cleaning of liquids from mechanical impurities and use of rotary filters. *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2009, vol. 31, no. 2, pp. 19–30 (in Russ.).
- [12] Devisilov V.A., Myagkov I.A., Lvov V.A., et al. Regeneriruemiy fil'tr [Regenerated Filter]. Patent RU 149 136 U1. Appl. 04.08.2014, publ. 20.12.2014 (in Russ.).
- [13] Myagkov I.A., Lvov V.A., Belovolova A.L. [Study on mechanism of centrifugal separation in a hydrodynamic vibrating filter]. *Sb. trudov VII Mezhdunar. ekologich. kongr. T. 6* [Proc. VII Int. Ecol. Cong. Vol. 6]. Samara–Tol'yatti, 2019, pp. 139–144 (in Russ.).
- [14] Brazhenko B.M. Theoretical research of the efficiency of a fluid mechanical cleaning by a rotary filter. *Wschodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe*, 2017, vol. 12 (28), no. 2, pp. 17–22 (in Russ.).
- [15] Devisilov V.A., Myagkov I.A., Lvov V.A., et al. Analytical model of suspensions separation in hydrodynamic filter with pivoting perforated partition. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in Technosphere], 2014, vol. 3, no. 5, pp. 32–41 (in Russ.).  
DOI: <https://doi.org/10.12737/6022>
- [16] Ternovskiy I.G., Kutepov A.M. *Gidrotsiklonirovanie* [Hydrocycloning]. Moscow, Nauka Publ., 1994.
- [17] Protod'yakonov I.O., Lyublinskaya I.E., Ryzhkov A.E. *Gidrodinamika i massoobmen v dispersnykh sistemakh zhidkost'-tverdoe telo* [Hydrodynamics and mass transfer in dispersed liquid-solid systems]. Leningrad, Khimiya Publ., 1987.
- [18] Malinovskaya T.A., Kobrinskiy I.A., Kirsanov O.S., et al. *Razdelenie suspenziy v khimicheskoy promyshlennosti* [Separation of suspensions in chemical industry]. Moscow, Khimiya Publ., 1983.
- [19] Aleksandrov A.A., Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Numerical investigation of fluid flow between rotating permeable cylindrical surfaces. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2020, no. 1 (88), pp. 32–45 (in Russ.).  
DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/1812-3368-2020-1-32-45>

**Devisilov V.A.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**L'vov V.A.** — Assist. Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Fatova A.V.** — Post-Graduate Student, Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Devisilov V.A., L'vov V.A., Fatova A.V. Study into solid particles moving in the working areas of part-flow hydrodynamic filters with a rotating perforated baffle. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 2 (141), pp. 112–127 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-112-127>