

# Гидродинамическое фильтрование

**В.А. Девисилов**, канд. техн. наук, доцент

**Е.Ю. Шарай**, старший преподаватель

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва

e-mail: devisilov@bmsu.ru, e9.sharay@yandex.ru

## Ключевые слова:

гидродинамическое фильтрование, классификация гидродинамических фильтров, ротационные фильтры, сепарация, проницаемый цилиндр, течение Куэтта – Тейлора, устойчивость течения, математическое моделирование.

На основе обзора современного состояния в области гидродинамического фильтрования показаны перспективы применения гидродинамических фильтров. Приведена классификация известных конструктивных схем гидродинамических фильтров по трем признакам: наличию-отсутствию шламовой жидкости, разновидности форм корпуса и фильтровальной перегородки, способам создания дополнительного силового поля. Отмечены достоинства и недостатки каждого типа гидродинамического фильтра. Рассмотрены основные подходы к описанию гидродинамического фильтрования на основе детерминированного подхода. Особое внимание уделено гидродинамическим фильтрам с дополнительной закруткой потока типа «цилиндр в цилиндре» и «цилиндр в конусе». Предложены перспективные направления исследования гидродинамического фильтрования.

## 1. Введение

Во многих отраслях промышленности существует проблема очистки дисперсных систем с жидкой дисперсионной средой от твердых частиц. Одним из перспективных направлений в области разработки аппаратов очистки жидкостей от механических примесей может стать сочетание фильтрования с силовым воздействием на поток, создающее дополнительное поле массовых сил, позволяющее улучшить условия очистки и восстановить пропускную способность фильтра самоочисткой фильтровальной перегородки от накопленного осадка. К таким устройствам относятся гидродинамические фильтры, реализующие принцип гидродинамического фильтрования [1]. От традиционного фильтрования гидродинамическое отличается тем, что очищаемая жидкость имеет касательную к фильтровальной поверхности компоненту скорости  $v_k$  (рис. 1 а, б). Гидродинамический эффект заключается в непрерывном удалении накопленного слоя осадка, а также в повышении тонкости очистки за счет того, что через ячейки фильтровального материала не проходят частицы, размер которых меньше размера самих ячеек. Реализация последнего эффекта требует высокой касательной скорости  $v_k$  потока по отношению к скорости фильтрации  $v_0$ . В разумных пределах соотношения данных скоростей гидродинамический

эффект проявляется для крупных частиц загрязнения размером более 300 мкм. Для уменьшения размера частиц, способных к удалению с фильтровальной перегородки, используется сочетание гидродинамического фильтрования с дополнительным силовым воздействием (рис. 1 в, г). В этом случае появляются дополнительные силы, обычно центробежные и вибрационные, которые оказывают дополнительное воздействие на частицу загрязнения вблизи фильтровальной перегородки и не дают ей закрепиться на поверхности.

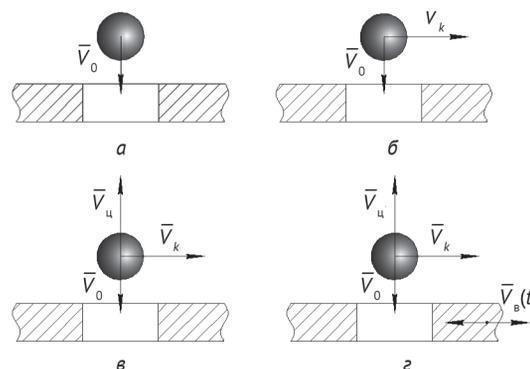


Рис. 1. Схема фильтрования: а – традиционного; б – гидродинамического; в, г – гидродинамического с силовым воздействием

Область применения гидродинамических фильтров достаточно обширна. Они могут использоваться в химической, нефтехимической, горной, металлургической промышленности, в коммунальном хозяйстве. Достоинство данных аппаратов в том, что при гарантированном соблюдении требуемой в технологическом процессе тонкости очистки, которая определяется размером ячейки фильтровального материала, обладают самоочищающейся способностью, в результате чего увеличивается время до регенерации, ресурс работы фильтра.

Наболее перспективно использование гидродинамических фильтров с силовым воздействием при очистке высоковязких и реологически сложных сред, проявляющих псевдопластические неньютоновские свойства. К ним относятся некоторые минеральные масла, растворы полимеров, сильнозагрязненные воды. При обычном фильтровании таких сред происходит быстрое забивание пор фильтровального материала, обусловленное облитерацией, требуются большие энергозатраты на очистку из-за высокой вязкости жидкости. Сочетание фильтрования с силовым воздействием создает дополнительный градиент скорости жидкости, что приводит к снижению эффективной вязкости, и, как следствие, к снижению облитерации и энергозатрат на очистку. В данной статье рассмотрены существующие в настоящее время схемы гидродинамических фильтров и основные подходы к описанию происходящих в них процессов.

## 2. Основные виды гидродинамических фильтров

Известно несколько типов гидродинамических фильтров, отличающихся организацией выходных потоков, формой канала рабочей области и способом закрутки потока, обеспечивающим создание дополнительного силового поля. Условно их можно разделить на восемь групп по трем признакам (табл. 1).

### 2.1. Наличие шламовой жидкости

Первый класс гидродинамических фильтров характеризуется наличием или отсутствием шламовой жидкости и включает две группы фильтров — полнопоточные и неполнопоточные [2]. В полнопоточных фильтрах (рис. 2, а) через фильтровальную перегородку проходит вся жидкость, поданная на очистку. Преимущество такого режима работы очевидно — это отсутствие шламовой жидкости. Однако самоочищающаяся способность таких фильтров ниже, чем неполнопоточных (рис. 2 б). Их применяют там, где необходим полный сбор загрязнений, при малой вязкости очищаемой среды с низкими облитерационными свойствами или при незначительной разнице между плотностью твердой и жидкой фаз.

В неполнопоточных гидродинамических фильтрах часть фильтруемой жидкости (обычно 10–15%) перепускается вдоль фильтровальной перегородки для смыва с ее поверхности накопленного осадка, а затем сбрасывается вместе с загрязнениями в емкость для фильтруемой жидкости или утилизируется после соответствующего обезвреживания как отход.

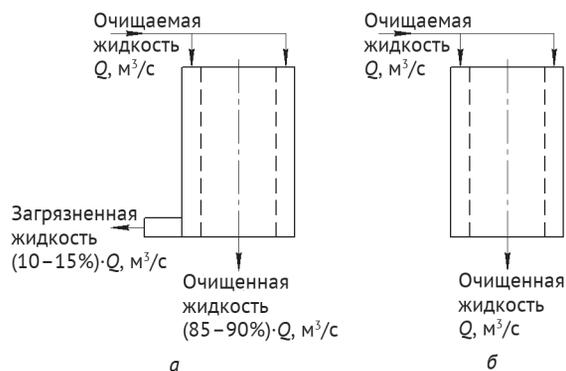


Рис. 2. Схема гидродинамических фильтров: а — полнопоточных; б — неполнопоточных

Таблица 1

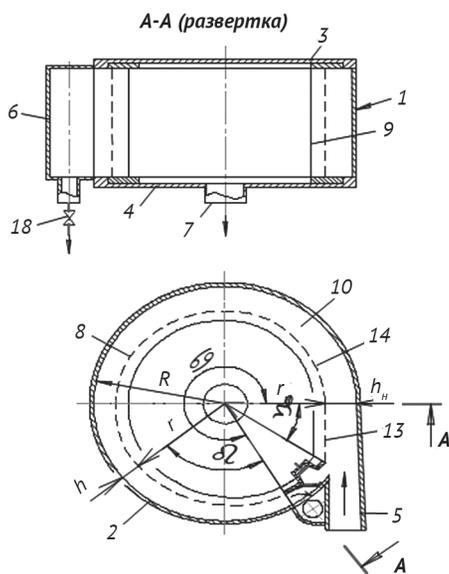
Классификация гидродинамических фильтров

Классификационный признак	Наличие/отсутствие шламовой жидкости	Форма корпуса и фильтровальной перегородки	Способ создания дополнительного силового поля
Группа гидродинамических фильтров	Полнопоточные (отсутствует шламовая жидкость)	«Цилиндр в цилиндре» [3–6]	Вращающаяся фильтровальная перегородка [5, 7, 8]
		«Цилиндр в конусе» [7, 8, 10]	Вращающаяся и вибрирующая фильтровальная перегородка [7–9]
		«Конус в цилиндре» [11, 12]	Вращающаяся фильтровальная перегородка с защитной обечайкой, в том числе с вибрацией фильтровальной перегородки [24–27]
	Неполнопоточные (шламовая жидкость составляет 10–15% исходного объема)	Дисковый [13]	Специальные закручивающие устройства: улитки, тангенциальный подвод, ленточные направляющие и пр. [7, 8, 28, 30]
		«Шар в шаре» [16, 17]	Большая кривизна поверхности фильтровальной перегородки [3, 4, 16, 17, 33]

## 2.2. Разновидности формы корпуса и фильтровальной перегородки

Существует широкое разнообразие гидродинамических фильтров по форме исполнения корпуса и фильтровальной перегородки, определяющей конфигурацию рабочего канала, в котором происходит сепарация частиц силовыми полями. Наиболее распространена конфигурация «цилиндр в цилиндре» (рис. 3) [3–6], что объясняется простотой изготовления. В таких фильтрах имеет место неравномерная нагрузка на фильтровальный материал, поскольку по мере движения потока очищаемой жидкости по рабочему каналу расход жидкости уменьшается, а также снижается продольная скорость и, как следствие, эффект гидродинамического смыва. Указанных недостатков лишены гидродинамические фильтры типа «цилиндр в конусе» (рис. 4) [7, 8, 10] и «конус в цилиндре» [11, 12] за счет изменяющейся площади поперечного сечения канала, но они требуют больших затрат на изготовление.

Наименее распространены аппараты типа «дисковый» (рис. 5) и «шар в шаре» в силу своих специфических форм (рис. 6). В «дисковом» гидродинамическом фильтре рабочий канал плоский, образован фильтровальной перегородкой и стенкой корпуса, выполненными в виде горизонтальных дисков [13, 14]. Проходя по каналу, основная часть потока фильтруется через дисковую фильтровальную перегородку



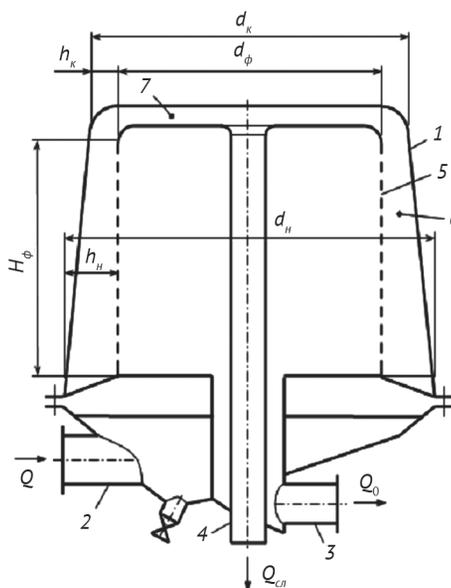
**Рис. 3.** Одноканальный гидродинамический очиститель [6]: 1 – цилиндрический корпус; 2 – цилиндр; 3, 4 – плоские торцевые крышки; 5 – входной патрубок; 6 – сливной патрубок; 7 – выпускной патрубок; 8 – боковая поверхность фильтроэлемента; 9 – фильтроэлемент; 10 – напорный канал; 13 – участок напорного канала, ограниченный углом  $\gamma$ ; 14 – участок напорного канала, ограниченный углом  $\alpha$ ; 18 – дроссель

ку, а оставшаяся часть с концентратом загрязнений удаляется через отверстие в центре перегородки. Аппараты данной конструкции отличаются низкой долей перепускаемой жидкости (5–7%) при простоте конструкции. Однако у них есть существенный недостаток: неравномерная скорость по длине канала за счет уменьшения расхода очищаемой жидкости от периферии к центру. Проблема решается выполнением одной из поверхностей канала в виде конуса, однако тогда конструкция перестает быть простой.

Наиболее сложны в конструктивном исполнении аппараты типа «шар в шаре», которые состоят из сферического корпуса со сферической фильтровальной перегородкой внутри [15–17]. При этом они имеют наибольшую площадь фильтрования при минимальных габаритных размерах, в этом их преимущество перед всеми остальными видами гидродинамических фильтров данной классификационной группы.

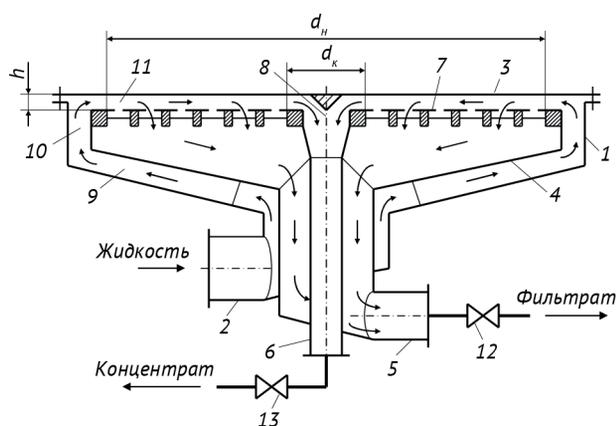
## 2.3. Способы создания силового поля

К третьей классификационной группе можно отнести гидродинамические фильтры, содержащие в своей конструкции элементы для создания дополнительной закрутки потока, которая позволяет снизить нагрузку на фильтровальный материал за счет сепарации части загрязнений центробежным механизмом. Здесь выделяется пять разновидностей гидродинамических фильтров: с вращающей-

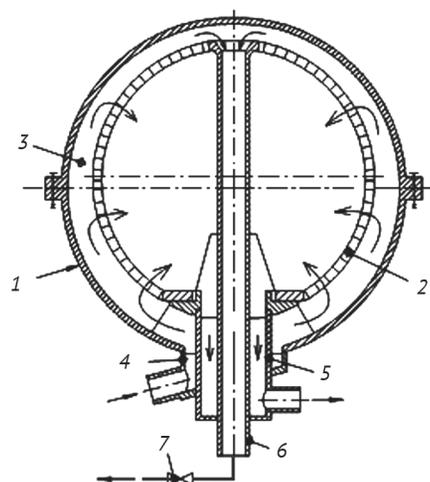


**Рис. 4.** Схема гидродинамического очистителя типа «цилиндр в конусе» [10]:

1 – конический корпус; 2 – подводящий патрубок; 3 – отводящий патрубок; 4 – сливной патрубок; 5 – цилиндрический фильтроэлемент; 6 – кольцевой напорный канал; 7 – торцевой канал



**Рис. 5.** Гидродинамический очиститель с плоским напорным каналом [14]:  
1 – цилиндрический корпус; 2 – входной патрубок; 3 – плоская крышка; 4 – цилиндрический фильтроэлемент; 5 – выходной патрубок; 6 – сливной патрубок; 7 – перфорированная плоская дисковая поверхность; 8 – центральное отверстие; 9, 10 – направляющие каналы; 11 – плоский дискообразный напорный канал; 12, 13 – задвижки

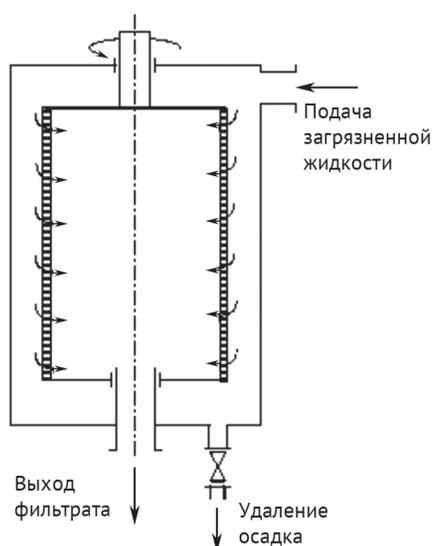


**Рис. 6.** Самоочищающийся фильтр типа «шар в шаре» [15]:  
1 – корпус; 2 – фильтроэлемент; 3 – зазор; 4 – входной патрубок; 5 – выпускной патрубок; 6 – сливной патрубок; 7 – регулировочный дроссель

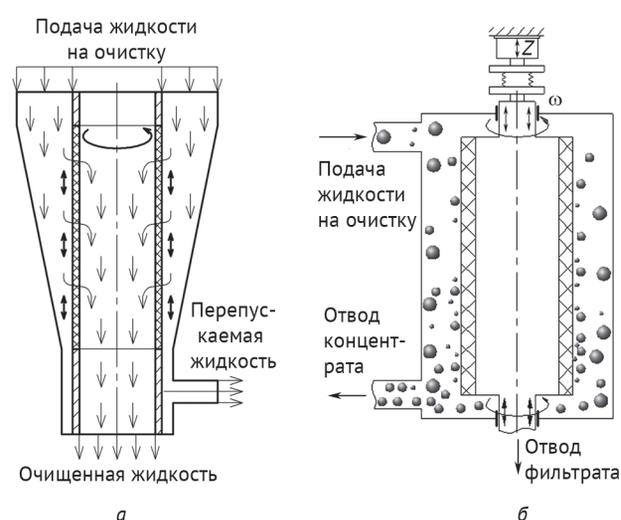
ся фильтровальной перегородкой; с вращающейся и вибрирующей фильтровальной перегородкой; с вращающейся фильтровальной перегородкой с защитной обечайкой; с фильтроэлементом большой кривизной поверхности; со специальными закручивающими устройствами.

Наибольший эффект от закрутки потока позволяют получить аппараты с вращающейся фильтровальной перегородкой, так как они позволяют регулировать частоту вращения в зависимости от свойств очищаемой среды и благодаря этому получать наибольшее силовое воздействие на очищаемый поток

при минимальных размерах фильтра [18] (рис. 7). При сочетании вращения фильтровальной перегородки с вибрацией вдоль оси вращения повышается самоочищающаяся способность фильтра за счет разрушения накопленного слоя осадка и одновременного удаления его с поверхности фильтровальной перегородки центробежными и гидродинамическими силами [7–9, 19–22] (рис. 8). Однако течение в канале, образованном корпусом и фильтровальной перегородкой, близко по своей структуре к течению Куэтта — Тейлора, которое, как известно, может быть неустойчивым [23]. С появлением макровихревых структур в рабочей зоне



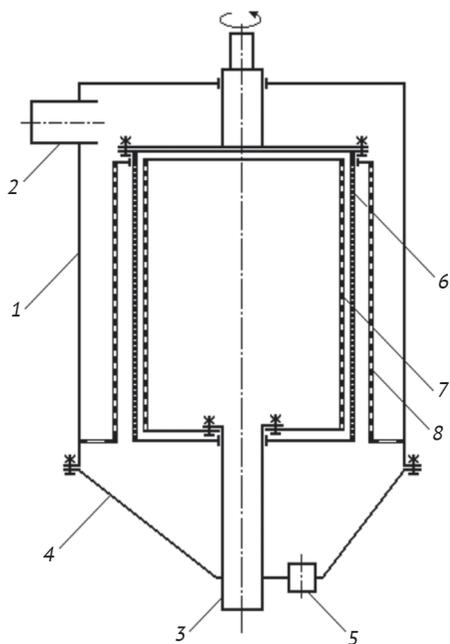
**Рис. 7.** Конструктивная схема ротационного фильтра [20]



**Рис. 8.** Схема гидродинамического вибрационного фильтра типа: а – «цилиндр в конусе» [19]; б – «цилиндр в цилиндре» [20]

ухудшается сепарация частиц за счет неравномерного распределения радиальной и продольной скорости по длине канала, часть фильтровальной перегородки может быть исключена из работы из-за циркуляции вторичных течений. Кроме того, наличие вихревых структур увеличивает гидравлическое сопротивление в фильтре. Поэтому для гидродинамических фильтров с вращающейся фильтровальной перегородкой необходимо выбрать оптимальные режимные параметры работы, при которых течение в рабочем канале будет безвихревым и устойчивым. Следует отметить, что в литературе гидродинамические фильтры с вращающейся фильтровальной перегородкой, в которых сепарация твердых частиц осуществляется центробежным механизмом, получили название ротационных фильтров [5, 24].

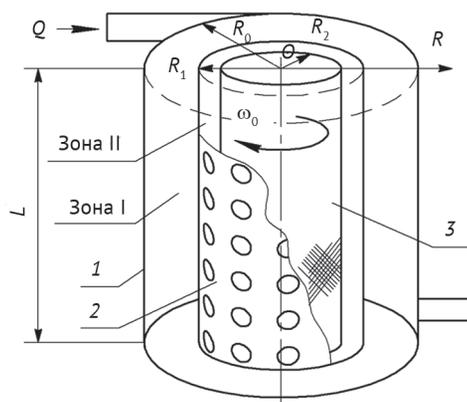
Предложены конструкции с перфорированной защитной обечайкой, расположенной между корпусом и фильтровальной перегородкой [25, 26] или с двумя защитными перфорированными обечайками, между которыми находится вращающаяся фильтровальная перегородка [24]. При этом перфорированная защитная обечайка может быть неподвижной (рис. 9) [24, 26] или вращающейся с той же скоростью, что и фильтровальная перегородка (рис. 10) [25, 27]. В первом случае эффект от применения защитной перфорированной обечайки заключается в умень-



**Рис. 9.** Конструктивная схема ротационного фильтра [24]: 1 – корпус; 2 – патрубок подвода жидкости; 3 – патрубок отвода жидкости; 4 – бункер; 5 – сливная пробка; 6 – вращающийся фильтрующий цилиндр; 7 – неподвижная внутренняя проницаемая цилиндрическая вставка; 8 – наружная цилиндрическая проницаемая вставка

шении энергозатрат на очистку за счет снижения потерь давления в фильтре [24]. Наличие вращающейся перфорированной обечайки позволяет производить сепарацию не только крупнодисперсных, но и мелкодисперсных частиц загрязнений, поскольку в кольцевом зазоре между фильтровальной перегородкой и перфорированной защитной обечайкой жидкость вращается как твердое тело с постоянной угловой скоростью, что препятствует проникновению мелкодисперсных частиц загрязнений к поверхности фильтровального материала [25]. Таким образом, вращающаяся перфорированная обечайка позволяет повысить ресурс работы гидродинамического фильтра самоочисткой фильтровальной перегородки и уменьшением размера частиц, отделяемых за счет центробежных сил, по сравнению с вращающейся фильтровальной перегородкой с аналогичной частотой, но в отсутствие защитной перфорированной обечайки. Однако данная конструкция, осложненная наличием дополнительных движущихся элементов, не решает проблемы вихреобразования в рабочем кольцевом канале и требует подбора режимных параметров, обеспечивающих устойчивое течение.

Принцип создания дополнительного силового поля в следующей группе гидродинамических фильтров основан на использовании стационарных устройств, позволяющих придать очищаемому потоку начальную закрутку на входе в аппарат. К таким устройствам относятся завихрители в виде ленточных спиральных направляющих, установленных во входной зоне фильтра [28, 30], или входной патрубков, установленный тангенциально по отношению к корпусу фильтра (рис. 11) [6–8, 25, 29]. Такая конструкция позволяет сообщать очищаемому потоку тангенциальную компоненту скорости, которая дает возможность отбросить к периферии корпуса твер-



**Рис. 10.** Схема течения в гидродинамическом фильтре [27]: 1 – корпус фильтра; 2 – перфорированная перегородка; 3 – фильтровальный элемент; I – зона тангенциального ввода очищаемой жидкости; II – защитная зона

дые частицы определенного размера, не допуская их оседания на фильтровальной перегородке. Крупность таких частиц зависит от интенсивности закрученного потока, которая определяется расходом жидкости или средней скоростью на входе в аппарат. Чтобы гарантированно частица загрязнений не попала на фильтровальную перегородку, необходимо создать высокую тангенциальную скорость во входной зоне фильтра, соизмеримую с входными скоростями в гидроциклонах, что лишает гидродинамическое фильтрование достоинства энергосбережения.

В случае применения специального стационарного закручивающего устройства в конструкции гидродинамического фильтра с вращающейся фильтровальной перегородкой зона сепарации частиц центробежным механизмом расположена по всей длине кольцевого канала [7, 8, 31, 32]. В этом случае нет необходимости создавать высокие скорости на входе в аппарат.

В литературе описаны конструкции гидродинамических фильтров, в которых очищаемый поток движется не вдоль образующей цилиндрической фильтровальной поверхности, как в [19, 20, 24, 27], а поперек (рис. 12) [3, 4, 16, 17, 32]. В этом случае, кроме гидродинамического эффекта, появляются инерционные силы, отбрасывающие частицы от фильтровальной поверхности. Однако для достижения указанного эффекта необходима большая кривизна поверхности, что приводит к большим габаритным размерам аппаратов в одном направлении, и высокой скорости движения жидкости по каналу относительно скорости фильтрации, что вызывает потери жидкости со сливом шлама до 30%. Для уменьшения габаритных размеров предложены конструкции шаровидной формы [16], но в данном случае повышается себестоимость фильтра, связанная с изготовлени-

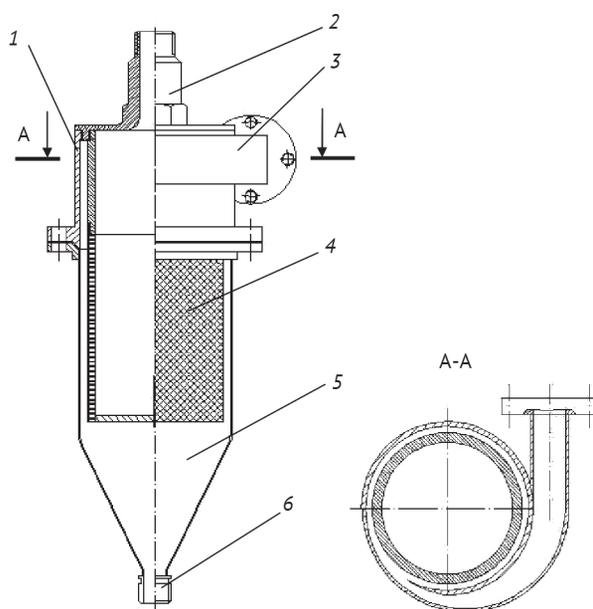


Рис. 11. Схема очистки жидких сред от механических примесей [29]: 1 – цилиндрический корпус; 2 – патрубок отвода очищенной жидкости; 3 – патрубок подвода очищаемой жидкости; 4 – цилиндрический фильтроэлемент; 5 – бункер; 6 – сливное отверстие

ем корпуса и фильтровальной поверхности сложной формы.

С точки зрения эффективности очистки, затрат на изготовление и эксплуатацию наиболее перспективны гидродинамические фильтры с цилиндрической фильтровальной перегородкой, очищаемый поток в которых движется вдоль образующей цилиндра, а в конструкции используется дополнительная закрутка потока. Рассмотрим далее аналитические, численные и экспериментальные исследования, касающиеся именно данного исполнения гидродинамических фильтров.

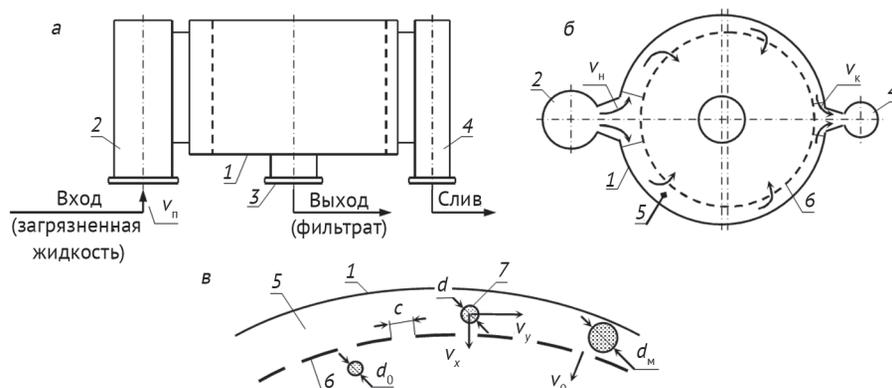


Рис. 12. Гидродинамический очиститель с круговыми цилиндрами: а – вид сбоку; б – поперечное сечение; в – схема гидродинамической очистки [33]. 1 – Цилиндрический корпус; 2 – входной патрубок; 3 – выходной патрубок; 4 – сливной патрубок; 5 – серповидные каналы; 6 – проницаемая поверхность фильтроэлемента; 7 – частичка

### 3. Подходы к описанию гидродинамического фильтрования

Существующие в настоящее время подходы к описанию гидродинамического фильтрования через цилиндрическую фильтровальную перегородку применяются в двух типах аппаратов — «цилиндр в цилиндре» и «цилиндр в конусе», причем первому виду посвящено большее количество исследований в силу менее сложной геометрической формы исследуемого канала. Основная задача большинства известных работ — описать гидравлические и сепарационные процессы в кольцевом канале, образованном цилиндрической фильтровальной перегородкой и корпусом фильтра, с целью определить оптимальные режимные параметры работы фильтра, гарантирующие устойчивое течение.

Наиболее распространен детерминированный подход к описанию процесса гидродинамического фильтрования, и лишь в некоторых работах, например в [27], учитывается наличие случайных процессов — используется вероятностно-статистический подход к описанию. В данной статье ограничимся рассмотрением известных работ, в которых использован детерминированный подход.

#### 3.1. Движение закрученного потока в кольцевом канале с вращающейся внутренней проницаемой поверхностью

Расчет гидродинамического фильтра с вращающейся внутренней проницаемой поверхностью сводится к определению оптимального отношения между окружной скоростью вращения фильтровальной перегородки и средней скоростью во входном тангенциальном патрубке, обеспечивающем максимальную сепарацию частиц центробежным механизмом и отсутствие вихреобразования, ухудшающего работу фильтра. В случае осевого подвода очищаемой жидкости в фильтр — к определению оптимальной частоты вращения фильтровальной перегородки [34].

Отрицательный эффект на процесс гидродинамического фильтрования оказывают вихри Тейлора, появляющиеся при течении жидкости между коаксиальными цилиндрами с неподвижным наружным и вращающимся внутренним, и нарушающие устойчивость течения. Условие возникновения вихрей определяется числом Тейлора  $Ta$  [35]:

$$Ta = Re \sqrt{\frac{h}{R}} = \frac{uh}{\nu} \sqrt{\frac{h}{R}} \geq 41,3,$$

где  $Re$  — число Рейнольдса;  $u$  — окружная скорость внутреннего цилиндра, м/с;  $h$  — ширина зазора между цилиндрами, м;  $\nu$  — кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;  $R$  — радиус внутреннего цилиндра, м. Область при числе Тейлора  $Ta < 41,3$  характеризу-

ется ламинарным течением Куэтта, имеющим точное аналитическое решение [36].

Однако выражение  $Ta \geq 41,3$  не является условием устойчивости течения в гидродинамическом фильтре, так как присутствуют факторы, оказывающие стабилизирующее влияние: вязкость и отсос части жидкости через проницаемую перегородку [37–39]. При фильтровании высоковязких сред потеря ламинарной устойчивости произойдет при большей частоте вращения, а также при уменьшении толщины пограничного слоя за счет отсоса части жидкости через вращающийся цилиндр. В [35] найдены две максимально допустимые частоты вращения фильтровальной перегородки. Условие отсутствия вихрей Тейлора с учетом отсоса жидкости через вращающийся цилиндр определяется выражением

$$\omega_{\max} = \frac{575Q}{2\pi R^2 l}, \quad (1)$$

где  $\omega_{\max}$  — максимально допустимая частота вращения, с<sup>-1</sup>;  $Q$  — пропускная способность фильтра, м<sup>3</sup>/с;  $R$  — радиус внутреннего цилиндра, м;  $l$  — длина фильтроэлемента, м. Ограничивает частоту вращения фильтроэлемента и дополнительный перепад давления, расходуемого на преодоление инерционности жидкости, вызываемой этим вращением [35]:

$$\omega_{\max} = \frac{2\Delta p}{\rho R^2}, \quad (2)$$

где  $\Delta p$  — перепад давления, МПа;  $\rho$  — плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>. В качестве предельно допустимой частоты вращения предлагается использовать наименьшее значение, полученное по формулам (1) и (2). Однако в указанных формулах отсутствует параметр  $h$  — ширина зазора между цилиндрами, который также оказывает влияние на процесс вихреобразования, что ограничивает применение указанных формул геометрическими размерами аппарата, для которого производилось исследование.

В [20] методом математического моделирования в полной трехмерной постановке получены картины течений вязкой среды в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами при наличии отсоса через внутренний вращающийся цилиндр (рис. 13). Также найдена граница устойчивости, характеризующаяся отсутствием вихрей и спиральными линиями тока:

$$\left(\frac{v_0}{u}\right)_{\max} = 10^{-5} Ta^{1,153},$$

где  $v_0$  — скорость отсоса через внутренний вращающийся цилиндр, м/с. Численными расчетами подтверждено, что вязкость среды и наличие отсоса

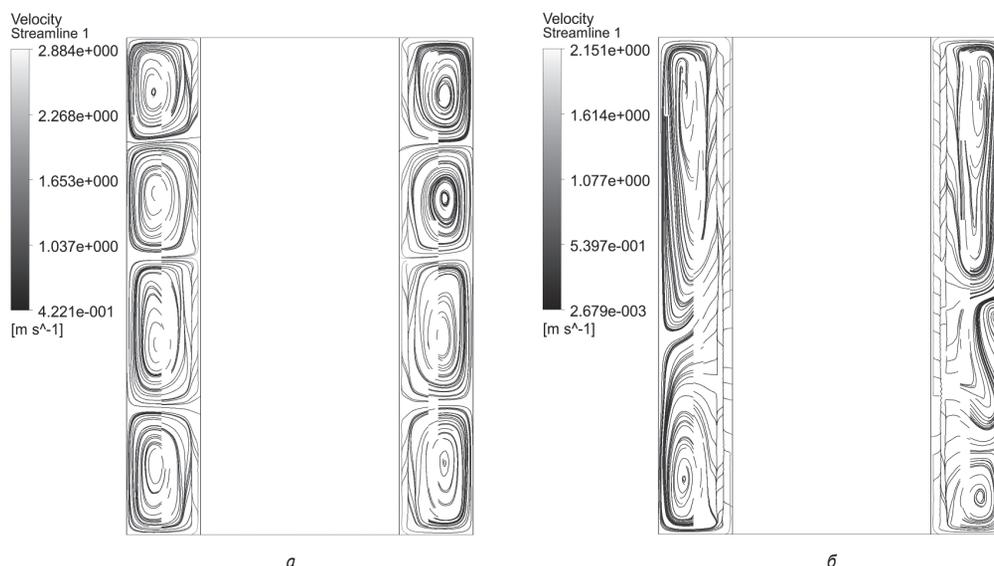


Рис. 13. Линии тока в кольцевой области между неподвижным наружным и вращающимся внутренним цилиндрами с отсосом через внутреннюю поверхность при  $Ta = 320$ : а –  $v_0/u = 2,9 \cdot 10^{-3}$ ; б –  $v_0/u = 4,8 \cdot 10^{-3}$  [20]

являются стабилизирующими факторами устойчивости течения, но результаты получены для одного типоразмера аппарата. Поэтому требуется продолжать исследования для установления границ применимости найденных в работе соотношений.

Влияние ширины кольцевого зазора на устойчивость течения обобщено и дополнено собственными исследованиями Е.В. Молчалиным [40, 41]. В его работах показано, что критическое значение  $Ta$ , соответствующее появлению макровихрей, перестает зависеть от относительной ширины кольцевого зазора  $\tilde{h} = (R_1 - R) / R$ , где  $R_1$  — радиус наружного цилиндра, с момента, когда под влиянием отсоса слой закрученной внутренним цилиндром жидкости становится тоньше ширины зазора между цилиндрами и при радиальном числе Рейнольдса  $Re_r = v_0 R / \nu \geq 100$  [40].

Для случая, когда граница появления макровихрей не зависит от ширины кольцевого зазора, оценивается зависимостью, полученной методами линейной теории гидродинамической устойчивости и верной при окружном числе Рейнольдса  $Re_\phi = uR / \nu \geq 10^7$  [41]:

$$(v_0)_{cr} = 0,26 Re_\phi^{-0,35} + 3,3 \cdot 10^{-4}, \quad (3)$$

где  $(v_0)_{cr} = v_0 / u$  — безразмерная критическая скорость отсоса. Наличие данной границы подтверждается численными расчетами, выполненными для двух значений относительной ширины кольцевого зазора  $\tilde{h}$  (рис. 14).

Не всегда соотношение между геометрическими размерами аппарата и режимными параметрами позволяет работать в указанном диапазоне устойчивого течения, не зависящего от ширины кольцевого канала.

Поэтому необходимо уточнить границы устойчивости с учетом влияния ширины кольцевого зазора.

Поскольку отсутствует полная методика расчета гидродинамического фильтра, для изучения структуры потоков в кольцевой области фильтра, определяющей вид устойчивости, применяется численное моделирование, основанное на решении системы уравнений Навье — Стокса [5, 20, 42–45]. Адекватность результатов моделирования во многом определяется правильностью выбранных моделей турбулентности, начальными и граничными условиями, а также методикой решения. На рис. 15 показано, как изменяется профиль окружной скорости в зазоре между корпусом фильтра и вращающейся фильтровальной перегородкой при двух моделях турбулентности [46]. В [47, 48] экспериментально подтверждена

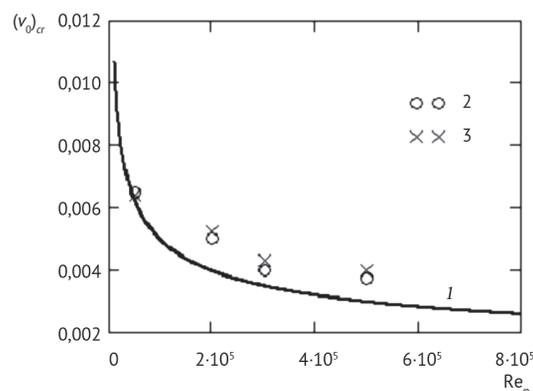


Рис. 14. Граница появления макровихрей в кольцевой области снаружи вращающегося цилиндра с отсосом жидкости [41]:

1 – зависимость (3); 2 – численный расчет  $\tilde{h} = 0,1$ ; 3 – численный расчет  $\tilde{h} = 0,2$

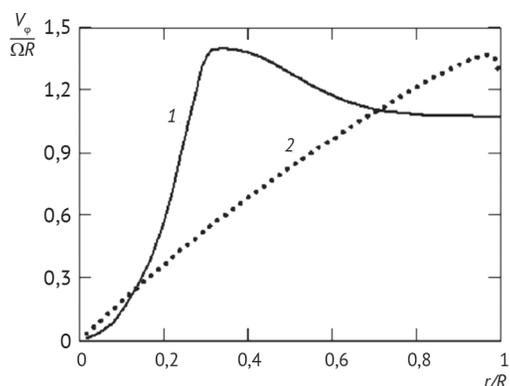


Рис. 15. Расчетный профиль окружной скорости в поперечном сечении [46]:

1 — модель переноса напряжений Рейнольдса; 2 — RNG  $k$ - $\epsilon$  модель

возможность применения  $k$ - $\epsilon$  модели и SSG-модели реингольдсовых напряжений для расчета турбулентных закрученных потоков в каналах.

В силу многофакторности гидродинамических и сепарационных процессов, происходящих в гидродинамических фильтрах типа «цилиндр в цилиндре» с вращающейся фильтровальной перегородкой, и сложности их учета при аналитическом описании в настоящее время отсутствует универсальная инженерная методика расчета таких аппаратов, учитывающая геометрические размеры аппарата, свойства дисперсной фазы и дисперсионной среды. Найденные границы устойчивости течения, позволяющие получить максимальную эффективность сепарации частиц центробежным механизмом, применимы в ограниченном диапазоне радиальных и окружных чисел Рейнольдса или получены для конкретных геометрических размеров фильтра. При определении оптимальных режимных параметров работы гидродинамических фильтров чаще всего используется численное моделирование, основанное на решении системы уравнений Навье — Стокса, результаты которого, как установлено в [46, 49, 50], хорошо согласуются с результатами экспериментальных исследований.

### 3.2. Движение закрученного потока в кольцевом сужающемся канале с вращающейся внутренней фильтровальной перегородкой

Определение оптимальных режимных параметров в гидродинамическом фильтре с вращающейся фильтровальной перегородкой и дополнительной закруткой потока типа «цилиндр в конусе» сводится

### Литература

1. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. М.: Недр, 1986.
2. Финкельштейн З.Л. Гидродинамическая очистка жидкости в промышленности // Горный информационно-

к нахождению отношения между скоростью вращения фильтровальной перегородки и средней скоростью на входе в фильтр, обеспечивающего дополнительную закрутку потока. Исследованию в данной области посвящено ограниченное число работ. В некотором приближении можно найти аналог между процессами, происходящими в зазоре между вращающейся фильтровальной перегородкой и коническим корпусом, с течениями в коническом гидроциклоне [51], и при рассмотрении сужающегося кольцевого канала с внутренней проницаемой поверхностью [52]. Известные в данном вопросе исследования пока не были применены к описанию гидродинамических фильтров типа «цилиндр в конусе». Следует отметить, что непосредственно воспользоваться существующими описаниями нельзя, так как они не учитывают все процессы гидродинамического фильтрования. Так, отсутствуют работы, описывающие течение в сужающемся кольцевом канале с вращающейся проницаемой внутренней стенкой. При расчете фильтров типа «цилиндр в конусе» используются методы численного моделирования и натурный эксперимент [53]. Решением уравнений Навье — Стокса получено распределение окружной, радиальной и осевой скоростей в рабочей части фильтра, найдены линии тока, определяющие структуру потоков для ньютоновских и псевдопластических сред [53].

### 4. Заключение

Гидродинамическое фильтрование как метод очистки жидкостей от твердых частиц заслуживает внимания, поскольку имеет ряд преимуществ перед традиционным фильтрованием, особенно при очистке высоковязких сред. Отечественными и зарубежными авторами доказана эффективность применения гидродинамических фильтров в технологических системах. К настоящему моменту отсутствует полная методика их расчета в силу многофакторности процессов, происходящих в рабочей зоне фильтра. Для определения оптимальных режимных параметров работы гидродинамических фильтров чаще всего используется численное моделирование, основанное на решении системы уравнений Навье — Стокса, которое требует соответствующих навыков. Для широкого распространения гидродинамических фильтров в отдельных отраслях промышленности необходимо создать инженерную методику расчета, которая позволит сократить время и трудозатраты на проектирование.

аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2004. Вып. 4. С. 235–237.

3. Пат. № 46507 А Україна, МПК В01D29/23, 35/02. Очистник потоку рідини / Бондаренко В.П.; заявник і патен-

- товласник Бондаренко В.П. — № 2001075440; заявл. 31.07.01; опубл. 15.05.02, Бюл. № 5. — 4 с.
4. Пат. № 64598 Україна, МПК В01D37/00. Спосіб очищення рідин від механічних домішок у потоці / Бондаренко В.П.; заявник і патентовласник Бондаренко В.П. — № 2003076535; заявл. 14.07.03; опубл. 15.07.05, Бюл. № 7.
  5. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Масштабный эффект при физическом моделировании механической очистки жидкостей ротационными фильтрами // Сб. научн. тр. ДонГТУ. 2011. Вып. 33. С. 30–38.
  6. Чебан В.Г. Одноканальный гидродинамический очиститель типа «цилиндр в цилиндре» // Вестник КрГУ имени М. Остроградского. 2012. Вып. 3 (74). С. 98–101.
  7. Фильтр самоочищающийся: пат. 150505 РФ: МПК В01D 33/29 / автор, заявитель и патентообладатель: В.А. Девисилов, Е.Ю. Шарай, И.А. Мягков. — № 2014131793/05; заявл. 01.08.2014, опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. — 2 с.
  8. Фильтр гидродинамический вибрационный: пат. 150506 РФ: МПК В01D 33/29 / автор, заявитель и патентообладатель: В.А. Девисилов, И.А. Мягков, Е.Ю. Шарай. — № 2014131794/05; заявл. 01.08.2014, опубл. 20.02.2015, Бюл. № 5. — 2 с.
  9. Финкельштейн З.Л., Поляков Е.А., Варейкис В.А., Звезильский Д.С. Фильтр для очистки жидкостей. А. с. № 1351628, 1986.
  10. Чебан В.Г. Характерные особенности гидродинамического очистителя жидкости типа «цилиндр в конусе» // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Сер.: Экология. 2012. № 2/12 (56). С. 46–49.
  11. Белов С.В., Девисилов В.А., Жданов В.Н., Беляев А.С., Симуков Е.А. Способ фильтрования суспензий и фильтр для его осуществления. А. с. № 1494932, 1989.
  12. Белов С.В., Девисилов В.А., Жданов В.Н., Петренчук А.К. Способ фильтрования и вибрационный фильтр для его осуществления. А. с. № 1567246, 1990.
  13. Пат. № 54061 У Україна, МПК В01D 37/00, 61/14. Спосіб розділення рідини на фільтрат і концентрат / Чебан В.Г.; заявник і патентовласник ДонГТУ. — u201004969; заявл. 26.04.2010; опубл. 25.10.2010, Бюл. № 20. — 4 с.
  14. Чебан В.Г., Антоненко С.С. Повышение эффективности гидродинамической очистки жидкости в плоском напорном канале // Вісник СумДУ. Серія «Технічні науки» 2010. № 3, Т. 1. С. 160–167.
  15. Чебан В.Г. Преимущества, недостатки и перспективы самоочищающихся очистителей жидкостей // Сборник научных трудов ДонГТУ. 2010. Вып. 30. С. 177–183.
  16. Пат. № 75525 С2 Україна, МПК В01D 37/00. Спосіб очищення рідин від механічних домішок / Бондаренко В.П., заявник і патентовласник Бондаренко В.П. — № 20040907238; заявл. 03.09.2004; опубл. 17.04.2006, Бюл. № 4. — 3 с.
  17. Пат. № 76243 С2 Україна, МПК В01D 29/11. Очистник потока рідини / Бондаренко В.П., заявник і патентовласник Бондаренко В.П. — № 20040604381; заявл. 07.06.2004; опубл. 17.07.2006, Бюл. № 7. — 5 с.
  18. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Эффективность сепарации взвешенных примесей вращающимся фильтроэлементом // Вестник Нац. техн. ун-та ХПИ: сб. науч. тр. Темат. вып.: Новые решения в современных технологиях. 2011. № 10. С. 3–9.
  19. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Моделирование работы гидродинамического фильтра с использованием программного комплекса // Безопасность в техносфере. 2009. № 5. С. 21–30.
  20. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Границы устойчивости в гидродинамическом фильтре // Безопасность в техносфере. 2013. №4. С. 26–32. DOI: 10.12737/717.
  21. Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамическое вибрационное фильтрование и конструкции фильтров // Безопасность жизнедеятельности. 2004. № 7. С. 37–47.
  22. Девисилов В.А., Мягков И.А. Гидродинамические вибрационные фильтры для регенерации отработанных масел и нефтепродуктов // Экология и промышленность России. 2005. № 7. С. 4–7.
  23. Джозеф Д. Устойчивость движений жидкости. М.: Мир, 1981.
  24. Мочалин Е.В. Гидродинамическое сопротивление ротационного фильтра усовершенствованной конструкции // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Сер.: Прикладная механика. 2001. № 2/7 (50). С. 31–34.
  25. Регенерируемый фильтр: пат. 149136 РФ: МПК В01D 33/29 / автор, заявитель и патентообладатель: В.А. Девисилов, И.А. Мягков, В.А. Львов, Е.Ю. Шарай. — № 2014132110/05; заявл. 04.08.2014, опубл. 20.12.2014, Бюл. № 35. — 2 с.
  26. Пат. 64474 А Україна, МПК В01D 33/00. Фільтр для очищення рідин / Е.В. Мочалин, О.В. Петренко, П.М. Криавоשה, О.О. Иванова; Донбас. гір. — металург. ін-т. — № 2003065285; заявл. 09.06.2003; опубл. 16.02.2004, Бюл. № 2. — 4 с.
  27. Девисилов В.А., Мягков И.А., Львов В.А., Шарай Е.Ю. Аналитическая модель процесса разделения суспензий в гидродинамическом фильтре с вращающейся фильтровальной перегородкой // Безопасность в техносфере. 2014. № 5. С. 32–41. DOI: 10.12737/6022.
  28. Валиулин С.С. Моделирование гидродинамических процессов в циклонной части фильтра-сепаратора // Вестник АГТУ. Сер.: Морская техника и технология. 2011. № 3. С. 72–77.
  29. Бревнов А.А. Общая методика расчета фильтра, использующего закрутку потока в комбинации с неподвижным сетчатым элементом // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2011. Вып. 33. С. 155–165.
  30. Асадипур М., Ратушный А.В. Математическое моделирование твердых частиц в гидродинамическом фильтре // Вестник СумДУ. Сер.: Технические науки. 2013. № 4. С. 116–118.
  31. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю., Агалакова Н.А. Исследование гидравлических характеристик течения жидкости в гидродинамическом фильтре с тангенциальной закруткой потока // Вектор науки ТГУ. 2013. № 2 (24). С. 32–37.
  32. Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Исследование поведения частиц в гидродинамическом фильтре на основе численных расчетов // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 1 (9). С. 2216–2222.
  33. Чебан В.Г. Расчет основных параметров гидродинамического очистителя с круговыми цилиндрами // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2011. Вып. 33. С. 11–21.

34. Байрамов М.Б. Очистка масел в сельскохозяйственном производстве с применением гидродинамических фильтров: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Институт инженеров сельскохозяйственного производства имени В.П. Горячкина, Москва, 1992.
35. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974.
36. Кочин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В. Теоретическая гидродинамика. Ч.2. М.: Физматгиз, 1963.
37. Cotrell D.L., Pearlstein A.J. Linear stability of spiral and annular Poiseuille flow for small radius ratio // *J. Fluid Mech.* 2006. V. 547. P. 1–20.
38. Takeuchi D.I., Jankowski D.F. A numerical and experimental investigation of the stability of spiral Poiseuille flow // *J. Fluid Mech.* 1981. V. 102. P. 101–126.
39. Ostilla R., Stevens R. J. A. M., Grossmann S., Verzicco R., Lohse D. Optimal Taylor-Couette flow: direct numerical simulations // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 719. P. 14–46. DOI: 10.1017/jfm.2012.596.
40. Мочалин Е.В. Гидродинамика и теплообмен в потоке Куэтта-Тейлора при вынужденном радиальном течении // *Современная наука: Сб. научн. статей.* 2012. № 2 (10). С. 251–259.
41. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Особенности проявления центробежной неустойчивости снаружи вращающегося цилиндра при протоке жидкости через его поверхность // *Вестник Нац. техн. ун-та ХПИ: сб. науч. тр. Темат. вып.: Нові рішення в сучасних технологіях.* 2010. № 57. С. 108–113.
42. Белоцерковский О.М., Опарин А.М., Четкин В.М. Образование крупномасштабных структур в зазоре между вращающимися цилиндрами (задача Рэлея–Зельдовича) // *Ж. вычисл. матем. и матем. физ.* — 2002. Т. 42, № 11. С. 1727–1737.
43. Ибяттов Р.И., Холпанов Л.П., Ахмадиев Ф.Г., Бекбулатов И.Г. Математическое моделирование течения многофазной гетерогенной среды по проницаемому каналу // *Теоретич. основні химич. технології.* 2007. Т. 41, № 5. С. 514–523. [Ibyatov R.I., Akhmadiev F.G., Kholpanov L.P., Bekbulatov I.G. Mathematical modeling of the flow of a multiphase heterogeneous medium in a permeable channel. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2007. T. 41. № 5. С. 490–499.]
44. Волк А.М. Движение вязкой жидкости в пространстве между вращающимися проницаемыми цилиндрами // *Труды БГТУ. Физико-математические науки и информатика.* 2012. № 6. С. 63–65.
45. Пакки Г.В., Ульянов Л.М. Ламинарный пограничный слой закрученного потока на пористом цилиндре при условии отсоса // *Интегрированные технологии и энергосбережение.* 2010. № 3. С. 31–35.
46. Мочалин Е.В. Физическое подобие и структура потока внутри вращающегося проницаемого цилиндра // *Современная наука: Сб. научн. статей.* 2010. № 2 (4). С. 84–88.
47. Montavon C.A., Grotjans H., Hamill I.S., Phillips H.W., Jones, I.P. Mathematical modelling and experimental validation of flow in a hydrocyclone // *BHR Conference on Cyclone Technologies.* 2000.
48. Bunyawanchakul P., Kirkpatrick M.P., Sargison J. E., Walker G. J. Numerical and experimental studies of the flow field in a cyclone dryer // *ASME Journal of Fluid Engineer.* 2006. No. 128 (6). P. 1240–1250. DOI: 10.1115/1.2354523.
49. Девисилов В.А., Мягков И.А., Шарай Е.Ю. Исследование гидродинамического вибрационного фильтрования и разработка конструкции фильтра // *Известия Самарского научного центра РАН.* 2012. Т. 14, №1(3). С. 866 — 876.
50. Мочалин Е.В., Мочалина И.Г. Теплообмен и гидравлические потери в потоке между соосными вращающимися цилиндрами при расходном течении жидкости // *Промышленная гидравлика и пневматика.* 2013. № 2 (40). С. 41–46.
51. Терновский И.Г., Кутепов А.М. Гидроциклонирование. — М.: Наука, 1994.
52. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях массовых сил: обзор работ, выполненных в ИТТФ НАН Украины. Часть 1. Закрутка потока в каналах // *Пром. теплотехника.* 2011. Т. 33, № 6. С. 11–25.
53. Devisilov V.A., Sharai E.Yu. Hydrodynamics of a Rheologically Complicated Liquid in a Self-Cleaning Filter // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2012. V. 46. № 6. P. 594. [Девисилов В.А., Шарай Е.Ю. Гидродинамика течения реологически сложной жидкости в самоочищающемся фильтре // *Теорет. основні хим. технології.* 2012. Т. 46. № 6. С. 631.]

## References

1. Finkelstein Z.L. *Primenenie i ochistka rabochikh zhidkостей dlya gornykh mashin* [Application and cleaning fluids for mining machines]. Moscow, Nedra Publ., 1986.
2. Finkelstein Z.L. *Gidrodinamicheskaya ochistka zhidkosti v promyshlennosti* [Hydrodynamic cleaning fluid used in the industry]. *Gornyj informatsionno-analiticheskij byulleten (nauchno-tekhnicheskij zhurnal)* [Mining information and analytical Bulletin (scientific and technical journal)], 2004, I. 4, pp. 235–237.
3. The Patent No. 46507 A Ukraine, IPQ B01D29/23, 35/02. The cleaner a fluid flow / Bondarenko V.P.; the applicant and the owner of the patent Bondarenko V.P. — No. 2001075440; it is declared 31.07.01; it is published 15.05.02, the bulletin No. 5. (in Ukrainian)
4. The Patent No. 64598 Ukraine, IPQ B01D37/00. A way of clearing of a liquid from mechanical impurity in a stream / Bondarenko V.P.; the applicant and the owner of the patent Bondarenko V.P. — No. 2003076535; it is declared 14.07.03; it is published 15.07.05, the bulletin No. 7. (in Ukrainian)
5. Mochalin E.V., Mochalin I.G. *Masshtabnyj ehffekt pri fizicheskom modelirovanii mekhanicheskoy ochistki zhidkостей rotatsionnymi filtrami* [Scale effect in the physical modeling of mechanical purification of liquids rotary filters]. *The collection of proceedings of DonSTU.* — Alchevsk: DonSTU. 2011, I. 33, pp. 30–38. (in Russian)
6. Cheban V.G. Single-channel hydrodynamic filter of «Cylinder in a Cylinder» type. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University.* — Kremenchuk: KRNU. 2012, I. 3 (74), pp. 98–101. (in Ukrainian)
7. Devisilov V.A., Sharai E. Yu, Myagkov I.A. *Fil'tr samoochishchayushchysya* [The self-cleaning filter]. Patent RF, no. 150505, 2014. (in Russian)

8. Devisilov V.A., Myagkov I.A., Sharay E.Yu. *Fil'tr gidrodinamicheskiy vibratsionnyy* [The hydrodynamic filter vibrating]. Patent RF, no. 150506, 2014. (in Russian)
9. Finkelstein Z.L., Polyakov E.A., Varejkis V.A., Zvegilskij D.S. *Filtr dlya ochistki zhidkostej* [Filter for the purification of liquids]. A.S. [Copyright Certificate] No. 1351628, 1986.
10. Cheban V.G. Specific features of the hydrodynamic filter of the liquid of type «The Cylinder in the Cone». *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2012, no. 2/12 (56), pp. 46–49.
11. Belov S.V., Devisilov V.A., Zhdanov V.N., Belyaev A.S., Simukov E.A. *Sposob filtrovaniya suspenzij i filtr dlya ego osushhestvleniya* [Method of filtering slurries and filter for its implementation]. A.S. [Copyright Certificate] No. 1494932, 1989.
12. Belov S.V., Devisilov V.A., Zhdanov V.N., Petrenchuk A.K. *Sposob filtrovaniya i vibratsionnyy filtr dlya ego osushhestvleniya* [Method of filtering and vibrating filter for its implementation]. A.S. [Copyright Certificate] No. 1567246, 1990.
13. The Patent No. 54061 U Ukraine, IPQ B01D 37/00, 61/14. A method of separating liquid into filtrate and concentrate / Cheban V.G.; the applicants and the owner of the patents DonSTU. — No. u201004969; it is declared 26.04.2010; it is published 25.10.2010, the bulletin No. 20. (in Ukrainian)
14. Cheban V.G., Antonenko S.S. Heightening of efficiency of hydrodynamic of a fluid in the flat pressure head channel. *Vestnik SumDU. Seriya «Tekhnicheskie nauki»* [The Visnyk of the SSU: technical sciences], 2010, no. 3, V.1, pp. 160–167. (in Russian)
15. Cheban V.G. *Preimushhestva, nedostatki i perspektivy samoochishhayushhikhysya ochistitelej zhidkostej* [Advantages, lacks and prospects of self-cleared filters of liquids]. *The collection of proceedings of DonSTU*. — Alchevsk: DonSTU, 2010, I. 30, pp. 177–183. (in Russian)
16. The Patent No. 75525 C2 Ukraine, IPQ B01D 37/00. Methods for removal of solids from the suspensions / Bondarenko V.P.; the applicant and the owner of the patent Bondarenko V.P. — No. 20040907238; it is declared 03.09.2004; it is published 17.04.2006, the bulletin No. 4. (in Ukrainian)
17. The Patent No. 76243 C2 Ukraine, IPQ B01D 29/11. The cleaner a fluid flow / Bondarenko V.P.; the applicant and the owner of the patent Bondarenko V.P. — No. 20040604381; it is declared 07.06.2004; it is published 17.07.2006, the bulletin No. 7. (in Ukrainian)
18. Mochalin E.V., Mochalin I.G. *Effektivnost separatsii vzveshennykh primesej vrashhayushhimysya filtroelementom* [The separation efficiency of suspended impurities rotating filter element]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta «KHPI»: sb. nauch. tr.* [Bulletin Of The NAT. tech. University “KHPI”: collection of scientific papers], 2011, no. 10, pp. 3–9.
19. Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Modelling of Work of the Hydrodynamical Filter with Use of the Program Complex. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere], 2009, no. 5, pp. 21–30. (in Russian)
20. Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Current stability limits in hydrodynamic filter. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere], 2013, No. 4, pp. 26–32. DOI: 10.12737/717. (in Russian)
21. Devisilov V.A., Myagkov I.A. *Gidrodinamicheskoe vibratsionnoe fil'trovanie i konstruksii fil'trov* [Pressure vibration filtering and filter design] // *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Health and Safety], 2004, no. 7, pp. 37–47. (in Russian)
22. Devisilov V.A., Myagkov I.A. *Gidrodinamicheskie vibratsionnyye fil'try dlya regeneratsii otrabotannykh masel i nefteproduktov* [Hydrodynamic vibration filters for regeneration of waste oils and petroleum products] // *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2005, no. 7, pp. 4–7. (in Russian)
23. Joseph D. *Ustojchivost dvizhenij zhidkosti* [Stability of fluid motions]. Moscow, Mir Publ., 1981.
24. Mochalin E.V. *Gidrodinamicheskoe soprotivlenie rotatsionnogo fil'tra usovershenstvovannoj konstruksii* [The hydrodynamic resistance of the rotary filter improved design]. *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [Eastern-European Journal of Enterprise Technologies], 2011, no. 2/7 (50), pp. 31–34.
25. Devisilov V.A., Lvov V.A., Myagkov I.A., Sharay E.Yu. *Regeneriruemyy fil'tr* [Regenerable filter]. Patent RF, no. 149136, 2014. (in Russian)
26. The Patent No. 64474 A Ukraine, IPQ B01D 33/00. Фільтр для очищення рідин / E.V. Mochalin, O.V. Petrenko, P.M. Kriavosheya, O.O. Ivanova; Donb. Institute of mining and metallurgy. — No. 2003065285; it is declared 09.06.2003; it is published 16.02.2004, the bulletin No. 2. (in Ukrainian)
27. Devisilov V.A., Lvov V.A., Myagkov I.A., Sharay E.Yu. Analytical Model of Suspensions Separation in Hydrodynamic Filter with Pivoting Perforated Partition. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere], 2014, no. 5, pp. 32–41. DOI: 10.12737/6022. (in Russian)
28. Valiulin S.S. Modeling of hydrodynamic processes in cyclone part of filter-separator. *Vestnik AGTU. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya* [Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies], 2011, no. 3, pp. 72–77. (in Russian)
29. Brevnov A.A. *Obshhaya metodika rascheta filtra, ispolzuyushhego zakrutku potoka v kombinatsii s nepodvizhnym setchatym ehlementom* [General method of calculation of the filter that uses the spin of flow in combination with a fixed sieve element]. *The collection of proceedings of DonSTU*. — Alchevsk: DonSTU, 2011, I. 3, pp. 155–165. (in Russian)
30. Asadipur M., Ratushnyi O.V. Mathematical modeling of solid particles motion in the hydrodynamic filters. *Vestnik SumDU. Ser.: Tekhnicheskie nauki* [The Visnyk of the SSU: technical sciences], 2013, no. 4, pp. 116–118. (in Russian)
31. Devisilov V.A., Sharay E.Yu., Agalakova N.A. Investigation of the hydraulic characteristics of fluid flow in hydrodynamic filter with tangential flow swirling. *Vektor nauki TGU* [The vector science TGU], 2013, no. 2 (24), pp. 32–37. (in Russian)
32. Devisilov V.A., Sharay E.Yu. Reserch of behavior of particles in the hydrodynamic filter on the basis of numeral calculations. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestiya Samara scientific center of the Russian Academy of Sciences], 2010, V. 12, no. 1 (9), pp. 2216–2222. (in Russian)
33. Cheban V.G. *Raschet osnovnykh parametrov gidrodinamicheskogo ochistitelya s krugovymi tsilindrami* [Calculation of main parameters of hydrodynamic purifier with circular cylinders]. *The collection of proceedings of DonSTU*. — Alchevsk: DonSTU, 2011, I. 33, pp. 11–21. (in Russian)
34. Bajramov M.B. *Ochistka masel v sel'skokhozyajstvennom proizvodstve s primeneniem gidrodinamicheskikh filtrov* [Purification of oils in agricultural production with the use

- of hydrodynamic filters]: *avtoref. ... kand. tekhn. nauk.*, Moscow, 1992.
35. Shlikhting G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [Boundary layer theory]. Moscow, Nauka Publ., 1974. (in Russian)
  36. Kochin N.E., Kibel I.A., Roze N.V. *Teoreticheskaya gidrodinamika* [Theoretical hydrodynamics]. P. 2. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. (in Russian)
  37. Cotrell D.L., Pearlstein A.J. Linear stability of spiral and annular Poiseuille flow for small radius ratio // *J. Fluid Mech.* 2006, V. 547, pp. 1–20.
  38. Takeuchi D.I., Jankowski D.F. A numerical and experimental investigation of the stability of spiral Poiseuille flow // *J. Fluid Mech.* 1981, V. 102, pp. 101–126.
  39. Ostilla R., Stevens R. J. A. M., Grossmann S., Verzicco R., Lohse D. Optimal Taylor-Couette flow: direct numerical simulations // *J. Fluid Mech.* 2013. V. 719. P. 14–46. DOI: 10.1017/jfm.2012.596.38.
  40. Mochalin E.V. *Gidrodinamika i teploobmen v potoke Kuetta-Teylora pri vyzhdenom radial'nom techenii* [Hydrodynamics and heat transfer in the flow of the Couette-Taylor at the forced radial flow]. *Sovremennaya nauka: Sb. nauchn. statey* [Modern science: Sat. Scien. Articles], 2012, no. 2 (10), pp. 251–259.
  41. Mochalin E.V., Mochalina I.G. *Osobennosti proyavleniya tsentrobezhnoj neustojchivosti snaruzhi vrashhayushhego tsilindra pri protoke zhidkosti cherez ego poverkhnost* [Peculiarities of manifestation of centrifugal instability outside of the rotating cylinder at the flow of fluid through the surface]. *Vestnik Nats. tekhn. un-ta "KHPI": sb. nauch. tr.* [Bulletin Of The NAT. tech. University "KHPI": collection of scientific papers]. 2010, no. 57, pp. 108–113.
  42. Belotserkovskii O.M., Oparin A.M., Chechetkin V.M. Formation of large-scale structures in the gap between rotating cylinders (the Rayleigh–Zeldovich problem). *Computational Mathematics and Mathematical Physics.* 2002, V. 42, no. 11, pp. 1661–1670.
  43. Ibyatov R.I., Akhmadiev F.G., Kholpanov L.P., Bekbulatov I.G. Mathematical modeling of the flow of a multiphase heterogeneous medium in a permeable channel. // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.* 2007, Vol. 41, no. 5, pp. 490–499.
  44. Volk A.M. *Dvizhenie vyazkoj zhidkosti v prostranstve mezhdru vrashhayushhimisya pronitsaemymi tsilindrami* [The motion of a viscous fluid in the space between rotating permeable cylinders]. *Trudy BGTU. Fiziko-matematicheskie nauki i informatika* [Proceedings of BSTU. Physico-mathematical science and computer science]. 2012, no. 6, pp. 63–65. (in Russian)
  45. Pakki G.V., Ulyev L.M. Laminar boundary layer of swirled flow on porous cylinder with subject suction. *Integrirrovannye tekhnologii i energosberezhenie* [Integrated technologies and energy saving]. 2010, no. 3, pp. 31–35. (in Russian)
  46. Mochalin E.V. *Fizicheskoe podobie i struktura potoka vnutri vrashhayushhego tsilindra* [Physical similarity and the structure of the flow inside a rotating permeable cylinder]. *Sovremennaya nauka: Sb. nauchn. statey* [Modern Science Collection of Research Papers], 2010, no. 2 (4), pp. 84–88. (in Russian)
  47. Montavon C.A., Grotjans H., Hamill I.S., Phillips H.W., Jones, I.P. Mathematical modelling and experimental validation of flow in a hydrocyclone // *BHR Conference on Cyclone Technologies*, 2000.
  48. Bunyawanihukul P., Kirkpatrick M.P., Sargison J. E., Walker G. J. Numerical and experimental studies of the flow field in a cyclone dryer // *ASME Journal of Fluid Engineer.* 2006, no. 128 (6), pp. 1240–1250. DOI: 10.1115/1.2354523.47.
  49. Devisilov V.A., Myagkov I.A., Sharay E.Yu. Investigation of hydrodynamic vibrational filtering and development of construction of a filter. // *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2012, V. 14, no. 1(3), pp. 866–876. (in Russian)
  50. Mochalin E.V., Mochalina I.G. *Teploobmen i gidravlicheskie poteri v potoke mezhdru soosnymi vrashhayushhimisya tsilindrami pri raskhodnom techenii zhidkosti* [Heat transfer and hydraulic losses in the flow between coaxial rotating cylinders with a consumable fluid flow]. *Promyshlennaya gidravlika i pnevmatika* [Industrial hydraulics and Pneumatics], 2013, no. 2 (40), pp. 41–46. (in Russian)
  51. Ternovskiy I. G., Kutepov A. M. *Gidrotsiklonirovanie* [Hydrocycloning]. Moscow, Nauka Publ., 1994. (in Russian)
  52. Khalatov A.A. *Teploobmen i gidrodinamika v polyakh massovykh sil: obzor rabot, vypolnennykh v ITTF NAN Ukrainy. Chast 1. Zakrutka potoka v kanalakh* [Heat transfer and fluid dynamics in fields of mass forces: review of work performed by the ITTF NAS. Part 1. Twist flow in the channels]. *Prom. teplotekhnika* [Industrial Heat Engineering], 2011, V. 33, no. 6, pp. 11–25. (in Russian)
  53. Devisilov V.A., Sharai E.Yu. Hydrodynamics of a Rheologically Complicated Liquid in a Self-Cleaning Filter // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2012, V. 46, No. 6, P. 594. DOI: 10.1134/S0040579512050119.

## Hydrodynamic Filtration

**V.A. Devisilov**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bauman Moscow State Technical University  
**E.Yu. Sharay**, Senior Lecturer, Bauman Moscow State Technical University

*Prospects of hydrodynamic filters application are demonstrated through the review of current state of hydrodynamic filtering. Acknowledged schemes of hydrodynamic filters are Classified by 3 parameters: presence/absence of sludge liquid, frame and filter design, extra force field creation means. Advantages and disadvantages of every type of hydrodynamic filter are noted. Major attitudes to hydrodynamic filtering are considered with deterministic approach. Special attention is paid to hydrodynamic filters with flow vortex of "cylinder in cylinder" and "cylinder in cone" types. Promising directions for further research of Hydrodynamic filtration are proposed.*

**Keywords:** hydrodynamic filtration, hydrodynamic filters classification, rotary filter, separation, permeable cylinder, Couette-Taylor flow, flow stability, mathematic simulation.