

УДК 669:628.16.06

*д.т.н., проф. Литвинский Г. Г.
(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, ligag@ya.ru)*

ПРЯМОТОЧНЫЕ ЦЕНТРОБЕЖНЫЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ С ЭЖЕКЦИОННОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИЕЙ ШЛАМА

Дано обоснование актуальности и выполнен критический анализ применения гидродинамических фильтров (ГД-фильтров). Показаны их конструктивные достоинства и обсуждены недостатки. Сформулированы требования к ГД-фильтрам и предложены критерии их экономической и технической эффективности. Рассмотрены конструкции и работа современных ГД-фильтров, в том числе нового технического уровня. Проведено сравнение технических показателей существующих и новых ГД-фильтров, рассмотрены возможности заметного их улучшения. Предложена новая конструкция прямоточного центробежного ГД-фильтра с эжекционной рециркуляцией шлама, дано описание принципов его работы. Особое внимание уделено принципиально новому способу удаления шлама, основанному на инжекторном и эжекторном струйных насосах в шламоловушке, создающих рециркуляцию шлама. Даны расчетные показатели работы завихрителя входного потока и оценены условия очистки жидкости за счет центробежных сил.

Ключевые слова: *фильтр, гидродинамическая очистка, фильтроэлемент, тонкость очистки, критерии эффективности фильтра, прямоточность потока, обтекатель, завихритель, профиль лопаток завихрителя, грязевой поток, шлам, шламоловушка, рециркуляция шлама, эжекция и инжекция шлама.*

1 Актуальность и цель исследований

Работа любой отрасли промышленности, особенно горной, связана с необходимостью применения гидравлики и смазочных устройств. При этом гидравлические рабочие жидкости и смазки должны отвечать строго регламентированным требованиям, из которых к числу первоочередных относятся их чистота и уровень загрязненности. Повышение уровня загрязненности в 1,5–2 раза уменьшает ресурс работы гидроустройств в 4–8 раз. В итоге загрязненность смазочных и рабочих жидкостей — причина 60–80 % аварийных остановок промышленного оборудования [1]. Поэтому последний период развития техники сопровождается бурным совершенствованием фильтрационной индустрии и появлением новых областей микро-, ультра- и нанопермации.

Источники и интенсивность появления загрязнений рабочих и смазочных жидкостей весьма разнообразны [2]: изготовление и сборка машин и устройств; заправка и обслуживание гидросистем; износ дета-

лей, омываемых жидкостью; разборка и сборка машин и агрегатов при их ремонтах и др. Стремление поддержания концентрации и размеров механических примесей в допустимых пределах в течение всего срока службы машины привело к разработке разнообразных конструкций фильтров, которые являются центральным элементом систем гидроочистки.

Там, где необходимо выполнять очистку больших объемов жидкости, что часто возникает в горной, металлургической, химической и других отраслях промышленности, все большее распространение получают гидродинамические (ГД) фильтры большой производительности (2000–2500 м³/час и более) [3]. Попутно заметим, что хотя термин «гидродинамические» фильтры технически мало обоснован и не вполне удачен, но тем не менее ввиду его распространенности нами используется в дальнейшем.

Заметный вклад в теорию и практику очистки жидкостей и особенно в разработку новых конструкций ГД-фильтров боль-

шой производительности сделал профессор З. Л. Финкельштейн в ДонГТИ [1, 4 и др.]. Он был в числе первых, кто осознал и в полной мере использовал главное достоинство ГД-фильтров: их способность к самоочистке [5].

В результате ГД-фильтры получают все большее применение в силу целого ряда преимуществ:

- относительной простоты конструкции из-за отсутствия подвижных и сложных элементов;

- низкой потери давления вдоль потока и на выходе;

- эффективной самоочистки в широком диапазоне скоростей и температур потоков жидкости;

- надежной работы без отказов при длительной эксплуатации без обслуживания и ремонтов фильтроэлементов;

- высокой степени очистки от механических примесей с частицами размером от 5 мкм до 20...30 мм и более;

- широкого диапазона производительности от 0,1 до 10^3 л/с;

- уменьшенного объема сливаемой жидкости (5...15 %) по сравнению с обычными фильтрами (20...30 %);

- гибкости и адаптивности применения в самых разных производственных условиях.

Тем не менее далеко не все потенциальные возможности ГД-фильтров удалось использовать. К тому же в предложенных ранее конструкциях фильтров имеется и ряд недостатков. К их числу относятся: возможное проникновение загрязнений при падении скорости потока на фильтроэлементе в моменты запуска и остановок, непрямоточность течения потоков жидкости; излишне сложное распределение скоростей потоков в фильтре; повышенное сопротивление из-за несоблюдения принципа обеспечения прямоточности потока; отсутствие попыток применения комбинированных методов очистки, дополняющих и улучшающих работу фильтроэлемента (например, центробежной очистки); малоэффективное использование эжекционной

рециркуляции на выходе грязепотоков; редкое применение ГД-фильтров не только для воды, но и других типов жидкостей, газов и т. д.

Цель исследования — совершенствование конструкции ГД-фильтров с использованием идеи комбинации их с принципами центробежной очистки и эжекционной рециркуляции. **Объектом исследований** являются конструкция ГД-фильтров и особенности их работы, а **предметом** — обоснование конструкционных параметров и технических показателей.

Основными **задачами исследования** являются:

- краткий анализ лучших существующих ГД-фильтров;

- формулирование технических требований к ГД-фильтрам;

- обоснование конструкции нового ГД-фильтра и особенностей его работы;

- изучение технических параметров и методики расчета нового фильтра.

2 Требования к ГД-фильтрам и критерии их технической эффективности

К настоящему времени [1–5 и др.] сложились вполне устоявшиеся требования к основным параметрам фильтрационных систем механической очистки, которые после обобщения сводятся к следующим:

- способность отфильтровывать минимальные по крупности частицы загрязнений в широком диапазоне изменения скоростей потока;

- непрерывная очистка жидкости с максимальной верхней границей крупности при заданной тонкости очистки;

- постоянство очистки независимо от колебаний массы и гранулометрического состава механических примесей;

- низкий и постоянный перепад давления независимо от массы загрязнений в исходном потоке жидкости;

- минимальный объем сливаемой жидкости и неограниченная грязеемкость;

- максимальная производительность по фильтрату при минимальных габаритах;

– отказ от потребности в техническом обслуживании, смены или регенерации фильтроэлементов;

– возможность установки непосредственно в гидросистему без изменения или переделки, в том числе для разного рода жидкостей;

– низкая стоимость, длительный срок службы, высокая надежность и безопасность.

Разумеется, адекватная оценка работы фильтров при таком обилии разноплановых характеристик становится затруднительной. Поэтому весьма желательно получить некоторые свертки этих параметров в виде одного или нескольких обзримых численных критериев. Обычно такие критерии можно получить даже для достаточно сложных технических систем с помощью теории подобия и размерностей по методике, изложенной в [6, 7].

Разработка критериев технической эффективности, всесторонне отражающих особенности и параметры систем очистки флюидов, является сложной самостоятельной задачей, которая выходит за рамки данного исследования.

Ограничим свою задачу сравнением фильтров, аналогичных по области применения, тонкости очистки, требованиям по уровню и гранулометрическому составу механических загрязнителей. Тогда для сравнительной оценки фильтров окажется достаточным использование наиболее простого и доступного критерия эффективности конструкторского решения фильтра $\Lambda_{Q/M}$.

Критерий $\Lambda_{Q/M}$ оценивает фильтр с точки зрения его производительности и материалоемкости в виде их отношения. Иными словами, критерий $\Lambda_{Q/M}$ показывает удельную производительность по фильтрату Q , которую дает каждая единица массы фильтра M :

$$\Lambda_{Q/M} = \frac{Q}{M}, [(m^3/c)/кг]. \quad (1)$$

Чем больше критерий $\Lambda_{Q/M}$, тем меньше удельная материалоемкость фильтра, тем выше его производительность, приходя-

щаяся на единицу массы, тем меньше затраты на материалы при изготовлении, тем ниже его стоимость при прочих равных факторах.

Кроме того, есть смысл использовать более универсальный критерий экономической эффективности $\Lambda_{Q/C}$, который отражает отношение производительности Q к стоимости C изготовления и эксплуатации фильтра:

$$\Lambda_{Q/C} = \frac{Q}{C}, [(m^3/ч)/₽]. \quad (2)$$

В затратные параметры, характеризующие систему очистки или отдельный фильтр, могут быть включены разного рода экономические показатели (затраты на обслуживание, ремонт и восстановление, сроки окупаемости и др.), что делает этот критерий $\Lambda_{Q/C}$ не вполне однозначным. Это обусловлено тем, что в рыночной экономике подобная информация обычно относится к коммерческой тайне фирм или сознательно извращается, что поневоле заставляет ограничиваться сравнением лишь технических данных, таких как критерий (1). Более того, нередко некоторые технические показатели также оказываются недостоверными или во многом сомнительными, так как под влиянием рыночной конкуренции в рекламных проспектах или описаниях конструкции они намеренно приводятся не вполне объективно.

Поэтому рассмотрим и сравним наиболее представительные конструкции ГД-фильтров по их идейному воплощению и по предложенным критериям эффективности.

3 Современные ГД-фильтры профессора З. Л. Финкельштейна

Известно достаточно много конструкций ГД-фильтров, предназначенных для отделения механических примесей из жидкостей. Как правило, такие фильтры состоят из цилиндрического корпуса с двумя торцевыми и одной боковой стенками. К боковой стенке радиально подведен входной патрубок, установленный в торце цилинд-

рического корпуса, а выходной патрубков, служащий для удаления твердой фазы, радиально прикреплен к боковой поверхности корпуса напротив входного патрубка.

Внутри корпуса симметрично ему установлен сетчатый фильтрующий элемент цилиндрической формы, образующий внутреннюю камеру, соединенную с выходным патрубком очищенной жидкости. Между сетчатым элементом и боковой стенкой корпуса расположена внешняя кольцевая камера, которая одним концом соединена с входным патрубком, а другим — с выходным патрубком фильтра.

Патенты на такую конструкцию ГД-фильтров были получены в СССР, РФ, Украине, США, Франции, Японии и др. В этих патентах проводилось постепенное совершенствование конструкции фильтра, в основном направленное на перераспределение потоков вокруг сетчатого элемента различной формы.

Самоочищающиеся ГД-фильтры стали принципиально новыми высокоэффективными фильтрами для отделения механических примесей из различных типов жидкостей (вода, масло, СОЖ и т. д.).

В качестве достаточно представительного примера таких конструкций рассмотрим ГД-фильтр, разработанный профессором З. Л. Финкельштейном.

Фильтр (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1 с входным 2, выходным 3 и сливным 4 патрубками и крышкой 5. В корпусе 1 установлен фильтроэлемент 7 с цилиндрической сеткой. К фильтроэлементу нержавеющая сетка крепится при помощи натяжного устройства, а по краям — при помощи бандажной проволоки. На крышке фильтра имеется вентиль 6 сброса воздуха в процессе заполнения фильтра водой.

В процессе очистки загрязненная жидкость поступает в каналы между корпусом и фильтроэлементом, обтекая последний по щели, сужающейся между ними. Большая часть жидкости проникает через фильтроэлемент во внутреннюю его полость, а затем через выход поступает потребителю. Мень-

шая часть потока смывает частицы грязи вдоль поверхности сетки и выходит через патрубок 4 на сброс в емкость отстоя.

Общий вид таких фильтров представлен на рисунке 2. Данные ГД-фильтры были успешно применены в широких промышленных масштабах на многих заводах и промышленных предприятиях (Мариупольский ММК им. Ильича, ЗАО «ММЗ „Истил-Украина“», Донецкий металлургический завод, Макеевский меткомбинат и коксохим и пр.) [<https://www.mashprom-zvd.ru/гидродинамические-фильтры/>].

Недостатком этих ГД-фильтров является сложное обратоточное движение потока жидкости, что значительно повышает гидравлическое сопротивление фильтра, снижает его пропускную способность, уменьшает качество очистки, усложняет конструкцию и увеличивает габариты. Кроме того, шламоловушка, представленная в виде бункера, имеет большой объем, её опорожнение от загрязнений производится циклично, что существенно усложняет обслуживание, причем объем слива достигает 10–20 % от общего объема фильтруемой жидкости.

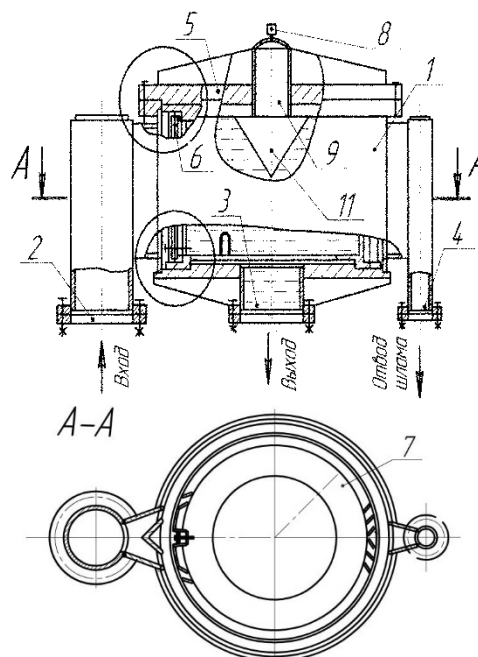


Рисунок 1 Устройство ГД-фильтра профессора З. Л. Финкельштейна



Рисунок 2 Общий вид ГД-фильтра конструкции проф. З. Л. Финкельштейна [8]

Одним из основных недостатков известных ГД-фильтров являются сложные изломанные трассы движения в нем потоков жидкости, создающие их турбулентность и дополнительные перепады давления. Такие потоки значительно повышают гидравлическое сопротивление фильтра, снижают его пропускную способность (производительность по фильтрату), что существенно увеличивает габариты и массу, ухудшают его технические показатели.

Кроме того, поскольку трасса входного потока повторяет внутренние контуры корпуса фильтра и фильтроэлемента, то механические загрязнения равномерно распределены по его сечению. Поэтому большая часть механических частиц вынуждена динамически взаимодействовать с сеткой фильтроэлемента, что приводит к ударам, скоплению и скольжению частиц по ее поверхности. Тем самым сетка фильтроэлемента как бы аккумулирует на своей поверхности воздействие всех частиц загрязнений, чем усугубляется ее непрерывный износ, засорение (кольматация) отверстий сетки, повышение перепада давления и снижение качества и тонкости очистки жидкости.

Большие габариты и масса известных ГД-фильтров высокой производительности (более 1000...2000 м³/ч) требуют проведе-

ния достаточно сложных работ по проектированию и переделке систем очистки жидкостей под такие фильтры. К тому же конструкция фильтра требует, как правило, фиксированного вертикального положения в пространстве (рис. 2) для обеспечения работы шламоловушки со шламоотстойником, что накладывает дополнительные ограничения на условия их промышленного применения.

Таким образом, существующие конструкции ГД-фильтров имеют значительные потенциальные резервы их совершенствования.

4 ГД-фильтры нового поколения

Прежде всего, следует сформулировать цели и задачи для разработки конструкции ГД-фильтров нового поколения, которые кратко сводятся к следующим:

- обеспечить прямолинейность движения входного и выходного потоков без резких торможений и поворотов, в идеальном случае реализованного в виде отрезка трубы, врезанного в разрыв линии общего трубопровода системы;

- осуществить взаимосогласованное сочетание в одной конструкции центробежного и гидродинамического способов фильтрации, в результате чего положительные качества каждого способа увеличиваются, а отрицательные — взаимно компенсируются;

- разработать новую конструкцию шламоловушки, в которой для регулировки густоты шлама в широких пределах и возможности снижения объемов слива использовать для грязевого потока принцип эжекционной рециркуляции;

- одновременно выполнить все требования к основным параметрам фильтрационных систем механической очистки, сформулированные в разделе 1.

Воплощение поставленных задач можно проследить по конструкции прямолинейного центробежного ГД-фильтра с эжекционной рециркуляцией (ПЦФ+ЭР). Техническая сущность и принцип действия пред-

ложенного устройства фильтра представлены на рисунке 3 [9].

Фильтр состоит из корпуса 1 с патрубками: подводящим 2 для входа рабочей жидкости и отводящим 3 для выхода очищенной жидкости. В корпусе 1 соосно с ним размещён фильтроэлемент 4, а внутри соосно с ним установлен обтекатель 5. Между корпусом 1 фильтра и обтекателем 5 находится рабочая полость 6 постоянного сечения.

Входная полость 7 между корпусом 1 фильтра и поверхностью фильтроэлемента 4 выполнена сужающейся по ходу движения жидкости. Фильтроэлемент 4 меньшим своим основанием закреплён на обтекателе 5, а большим основанием примыкает к кольцевой щели 8, переходящей в спирально-винтовой канал 9 шламолушки. Входная полость 7 сужается вдоль потока жидкости. Перед кольцевой щелью 8 входной полости 7 размещён завихритель 10.

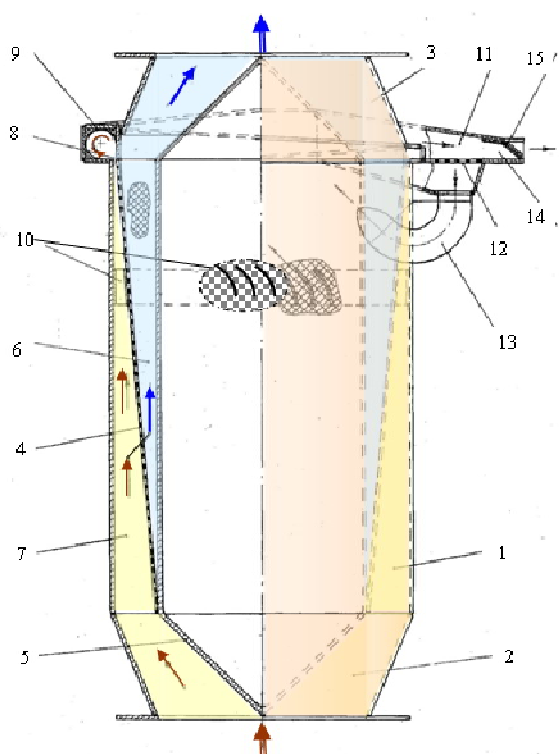


Рисунок 3 Устройство прямоточного центробежного ГД-фильтра (ПЦДФ) с эжекционной рециркуляцией [9]

Шламолушка содержит спирально-винтовой канал 9 вокруг корпуса 1, переходящий в разделительную камеру 11 сгустителя, выполненную в виде сужающейся усечённой пирамиды. Одна из ее граней снабжена фильтроэлементом 12 возврата, за которым расположен возвратный канал 13. Он, в свою очередь, после завихрителя 10 подсоединён к входной полости 7 по касательной к скорости потока жидкости. Разделительная камера 11 переходит в шламовый канал 14, который снабжён дроссельным клапаном 15 в виде регулируемой заслонки и заканчивается сливом.

Прямоточный ГД-фильтр работает следующим образом.

Подлежащая очистке жидкость поступает в корпус 1 через подводящий патрубок 2, обгибает обтекатель 5 и попадает во входную полость 7, проходит через фильтроэлемент 4 и, после очистки от загрязнений, в виде фильтрата выходит в отводящий патрубок 3.

Загрязнённая часть потока вне фильтроэлемента 4, проходит через завихритель 10, который приводит её во вращательное движение. Вращательно-поступательно перемещаясь в сужающейся части входной полости 7, жидкость продолжает проходить через фильтроэлемент, а оставшаяся ее часть поступает в виде грязевого потока через кольцевую щель 8 в спирально-винтовой канал 9 шламолушки.

Сброшенный в канал 9 грязевый поток совершает сложное бивихревое движение из двух взаимно перпендикулярных векторов угловой скорости, представляющих вихревое вращение относительно оси корпуса и перпендикулярное ему вращение относительно оси спирально-винтового канала 9. Это обеспечивает полную зачистку канала 9 по всему периметру от скопления грязевых отложений. Поперечное сечение спирально-винтового канала 9 выполнено переменным пропорционально увеличению поступающего грязевого потока по мере его сбора в шламолушку.

Грязепоток вдоль канала 9 попадает в разделительную камеру 11 сгустителя, которая выполнена сужающейся по ходу его движения. В камере 11 происходит отделение излишка жидкости от грязепотока с помощью фильтроэлемента возврата 12. Этот излишек жидкости за счёт перепада давлений, приводящего к эффекту эжекции, попадает во входную полость 7 через возвратный канал 13. Последний подсоединён после завихрителя 10 к входной полости 7 по касательной к скорости потока жидкости, где грязепоток с ней смешивается и проходит повторную очистку.

Сгущённый грязепоток, который не прошёл через фильтроэлемент возврата 12, поступает в шламовый канал 14, где он уплотняется до консистенции шлама и через регулируемый дроссельный клапан 15 направляется через слив 16 в шламонакопитель (не показан).

Обтекатель обеспечивает повышение скорости движения рабочей жидкости в рабочей полости и при неизменной её аксиальной компоненте вдоль всей трассы потока. Это позволяет заметно улучшить эффект гидродинамического смыва загрязнений с поверхности фильтроэлемента и абсолютную тонкость очистки. Постоянное сечение рабочей полости обеспечивает постоянство скорости движения жидкости относительно фильтроэлемента, что, в свою очередь, даёт неизменную тонкость очистки по всей его площади и улучшает работоспособность фильтра. Кроме того, наличие обтекателя позволяет уменьшить длину фильтра за счёт незначительного увеличения его диаметра.

Завихритель создаёт вращение потока жидкости относительно оси фильтроэлемента, что позволяет за счёт центробежных сил отбросить частицы загрязнений с поверхности сетки фильтроэлемента. Тем самым исключается скопление загрязнений и очищается спирально-винтовой канал шламовой камеры.

Кольцевая щель существенно ограничивает расход жидкости, попадающей в шламовую камеру, а эксцентричное подсоединение кольцевой щели относительно

центра тяжести поперечного сечения спирально-винтового канала создаёт в нём бивихревое вращение грязепотока, что гарантирует его перемещение вдоль спирально-винтового канала, ускоряет сегрегацию частиц и повышает концентрацию грязепотока. Это существенно улучшает работоспособность фильтра.

Выполнение канала шламовой камеры спирально-винтовой формы позволяет обеспечить изменение её поперечного сечения в соответствии с объёмом поступающего грязепотока, при этом поперечное сечение спирали выполнено круглым, что заметно снижает гидравлическое сопротивление.

Разделительная камера сгустителя в форме усечённой пирамиды позволяет отделить излишки жидкости от грязепотока с помощью фильтроэлемента возврата 12, выполняющего роль одной из граней пирамидальной камеры. Это заметно снижает потери рабочей жидкости на сливе и позволяет повторно фильтровать эти излишки путём направления их во входную полость, т. е. обеспечить её рециркуляцию. За счёт того, что возвратный канал подсоединён между завихрителем и кольцевой щелью к входной полости фильтра по касательной к скорости исходного потока жидкости, возникает перепад давлений, приводящий к эффекту эжекции и облегчающий рециркуляцию жидкости в фильтре. При этом увеличивается эффективность работы фильтра.

То, что разделительная камера сгустителя переходит в шламовый канал, который снабжён дроссельным клапаном в виде регулируемой заслонки и соединён со сливом, позволяет уменьшить объём слива, регулировать концентрацию шлама и, повышая её до необходимого уровня, значительно уменьшить объёмы шламонакопителей и хвостохранилищ.

Выполним ориентировочную оценку эффективности сравниваемых конструкций фильтров, используя результаты раздела 2. Для фильтра-аналога [3] воспользуемся данными рекламного сайта, а для фильтра ПЦГФ-1 — проектными расчётными параметрами (табл. 1).

Таблица 1
Сравнение технических показателей фильтров

Технические параметры ГД-фильтра	Тип ГД-фильтра	
	Ф-1*	ПЦГФ
Входной поток, м ³ /ч	4000	4000
Поток фильтрата, м ³ /ч	3200	3800
Объем грязепотока, %	20	5
Мах размер частиц, мм	5	5
Тонкость очистки, мкм	500	20
Падение давления, кПа	50	20
Масса, кг	6500	960
Критерий эффект. $\Lambda_{Q/M}$	0,57	3,96

*<http://vector99.narod.ru/filters.html>.

За счет своих явных принципиальных конструктивных преимуществ перед аналогами (прямоточность потока, центробежное отделение крупных частиц загрязнений, эжекционная рециркуляция, устройство для удаления грязепотока и пр.) фильтр нового технического уровня ПЦГФ оказывается существенно лучше. Так, только по критерию технической эффективности фильтр ПЦГФ превосходит аналог в $3,96/0,57=7,8$ раза (табл. 1). Примерно такого же порядка преимущества наблюдаются и по большинству остальных технических характеристик (объем грязепотока сброса, тонкость очистки, падение давления, β -характеристики и др.). Тем самым становится очевидной необходимость перехода к системам фильтрации с фильтрами нового поколения.

5 Разработка ГД-фильтров новой конструкции

Анализируя конструкцию нового ГД-фильтра, можно заключить, что она несовершенна. В частности, критический анализ конструкции такого фильтра позволяет выявить ряд присущих ему недостатков (рис. 3):

– внешние контуры корпуса 1 фильтра выходят за габариты подающих основной поток труб, что усложняет размещение и монтаж фильтра;

– не вполне целесообразно устанавливать внутри фильтра объемный обтекатель 5, который хотя и служит для увеличения скорости потока и способствует уменьшению угла наклона фильтроэлемента 4, но при этом увеличивается диаметр корпуса, создается повышенное сопротивление и тем самым повышается перепад давления;

– завихритель потока 10 установлен не в подводящем патрубке 2 в начале фильтроэлемента 4, а заметно ближе к отводящему патрубку 3, что существенно снижает эффективность использования центробежных сил по отбросу грязевых частиц от фильтроэлемента 4 к стенкам корпуса 1;

– в конструкции завихрителя 10 не указаны его параметры и не рассмотрены особенности его взаимодействия с исходным потоком жидкости;

– ряд замечаний вызывает конструкция шламоловушки, которая, несмотря на сохраняющуюся функциональность, остается неоправданно сложной, а реализация эжекционной рециркуляции явно нуждается в пересмотре для повышения эффективности.

Вновь предлагаемый ГД-фильтр представлен на рисунке 4. Прежде всего, обращает на себя внимание общая конфигурация корпуса 1 фильтра, которая является продолжением основного трубопровода очищаемой жидкости.

Преимущества такого конструктивного исполнения фильтра очевидны с позиций возможностей его практической реализации, простоты монтажа, замены и эксплуатации.

Вход 2 и выход 3 фильтра являются продолжением основного трубопровода, они прикреплены к нему обычными фланцевыми соединениями. Поступающий поток загрязненной жидкости через вход 2 попадает на обтекатель 4, а затем в рабочую полость 5, внутри которой установлен фильтроэлемент 6 соосно с завихрителем 7, которые закреплены совместно на обтекателе 4. Фильтроэлемент 6 выполнен в виде усеченного расширяющегося конуса, который своим концом опирается на кольцевой канал 8 и примыкает к внутреннему периметру кор-

пуса 1 фильтра перед выходом 3. Канал 8 улавливает и распределяет шлам, оставшийся в рабочей полости 5 после фильтрации потока, в шламовушку 9 (рис. 4).

Шламовушка 9 (рис. 4) состоит из корпуса 10 и соосного с ним цилиндрического фильтроэлемента 11 с примыкающим к нему шламосборником 12.

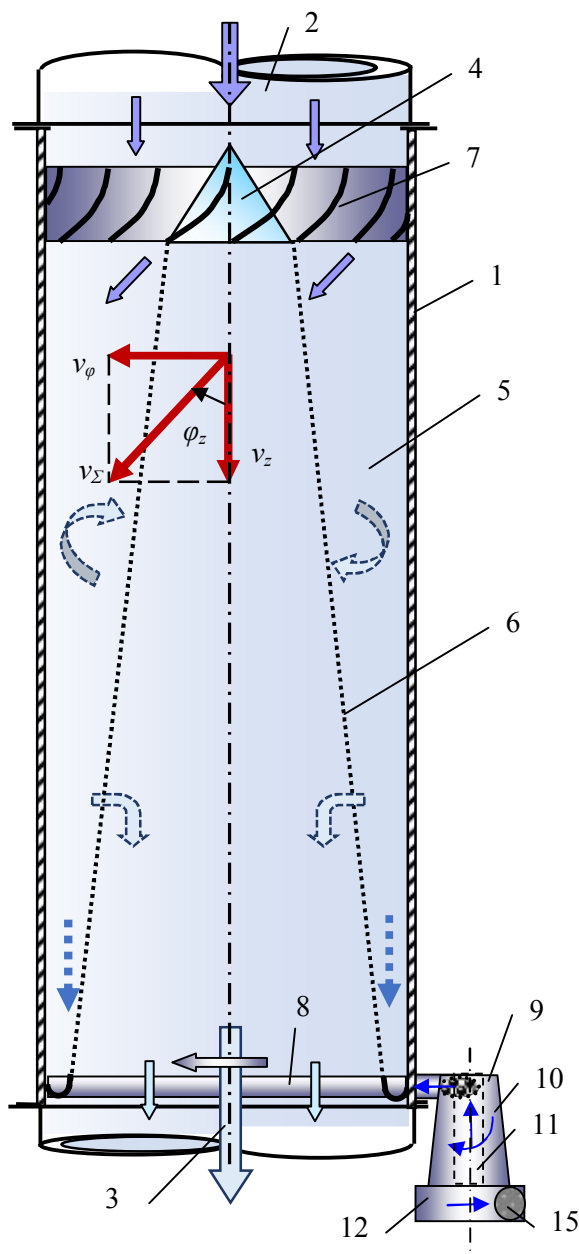


Рисунок 4 Новый прямооточный центробежный ГД-фильтр (ПЦГФ) с эжекционной рециркуляцией

К кольцевому каналу 8 шламовушка 9 подсоединена двумя патрубками 13 и 14. Входной патрубок 13, направлен против кольцевого движения загрязненной струи из канала 8 и является инжекционным струйным насосом. Он выводит струю в верхнюю часть шламовушки 9 по касательной к ее конусообразной стенке корпуса 10.

Выходной патрубок 14 выполняет функцию эжекционного струйного насоса. Он соединяет внутреннюю верхнюю часть фильтроэлемента 11 с кольцевым каналом 8, где он направлен по ходу движения загрязненной струи. Из шламосборника 12 по касательной к его внутренней стенке выходит шламовый канал 15, который снабжен дроссельным клапаном в виде регулируемой заслонки и заканчивается сливом (не показаны).

Новый прямооточный ГД-фильтр работает следующим образом.

Загрязненный механическими частицами исходный поток поступает в корпус 1 через подводящий патрубок 2, огибает обтекатель 4, проходит через завихритель 7 и, закручиваясь, приобретает окружную компоненту скорости v_φ (рис. 4, 5). Поскольку обтекатель закрывает своей площадью A_O живое сечение A_F корпуса 1 фильтра, то осевая скорость v_z потока увеличится (рис. 4):

$$v_z = \frac{v_{z0}}{1 - A_O / A_F}, \text{ м/с}, \quad (3)$$

где v_{z0} — исходная осевая скорость потока, м/с.

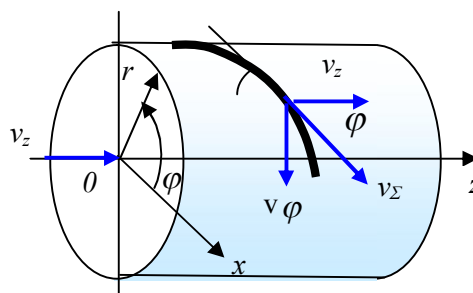


Рисунок 5 Схема распределения скоростей грязепотока на завихрителе 7

Так как осевая скорость v_z потока должна оставаться постоянной по всей длине фильтра, то, если известен угол φ_z , на который завихритель 7 поворачивает весь поток, нетрудно определить окружную, полную и угловую скорости потока:

$$\begin{aligned} v_\varphi &= v_z \cdot \operatorname{tg} \varphi_z; \quad v_\Sigma = v_z / \operatorname{Cos} \varphi_z, \\ d\varphi / dt &= \dot{\varphi} = v_\varphi / r = v_z \cdot \operatorname{tg} \varphi_z / r, \end{aligned} \quad (4)$$

где φ_z — угол закрутки потока на завихрителе, рад.

Исходный поток с грязевыми частицами совершает поступательно-вращательное движение, за счет чего на каждую частицу в нем действует центробежная сила $F(r, \varphi)$, отжимающая ее к стенке фильтра и возрастающая пропорционально радиусу вращения:

$$\begin{aligned} F(r, \varphi) &= m \cdot V_\varphi^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \varphi_z / r, \\ F(r, \varphi) &= mr \cdot (\dot{\varphi} \cdot \operatorname{tg} \varphi_z)^2, \end{aligned} \quad (5)$$

где m — масса частицы, кг;

r — текущий радиус (радиальная координата) частицы в фильтре, $r_f \leq r \leq R_\phi$, м;

r_f, R_ϕ — радиусы соответственно фильтроэлемента и стенки фильтра, м;

$\dot{\varphi} = d\varphi / dt$ — угловая скорость вращения потока жидкости, рад/с.

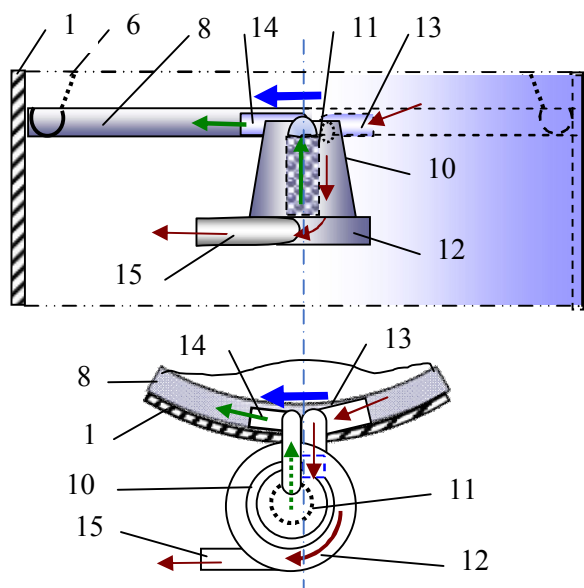


Рисунок 6 Шламолушка 9 с инъекцией 13 и эжекцией 14 шлампотоков

Следовательно, центробежные силы, действующие на частицу, тем больше, чем больше ее масса и удаление от оси фильтра, и пропорциональны квадрату угловой скорости вращения потока жидкости. Тем самым достигается отброс от фильтроэлемента к стенке фильтра всех самых тяжелых частиц, что предохраняет фильтроэлемент 6 от износа и заметно (иногда в разы) улучшает β -характеристику фильтра.

После завихрителя 7 струя получает вращательно-поступательное движение во входной полости 5 и вытесняется, очищаясь от загрязнений, во внутреннюю полость фильтроэлемента 6, из которой в виде фильтрата выходит в отводящий патрубок 3.

Оставшаяся загрязнённая часть потока вне фильтроэлемента 6 после завихрителя 7 получает вращение. Поступательно двигаясь в сужающейся части входной полости 7, струя концентрации загрязнений увеличивает поток частиц, отброшенных центробежными силами к стенкам фильтра, в конце грязепопота через кольцевую щель 8 попадает в шламолушку 9 через входной патрубок 13. Входная струя с загрязнениями входит в конусообразный корпус 10 по касательной и, вращаясь вокруг цилиндрического фильтроэлемента 11, переводит свою кинетическую энергию в статический напор, отправляя грязевые частицы через шламоборник 12 в шламовый канал 15. Необходимую плотность выходящего шлама обеспечивает запорно-регулирующая арматура (не показана).

Излишек жидкости за счёт перепада давлений и эффекта эжекции попадает из корпуса 10 через фильтроэлемент 11 в выходной патрубок 14 и затем вливается в грязепопота канала 8.

Ввиду того, что решающим фактором, обуславливающим движение грязевых частиц внутри фильтра, являются скоростной напор потока и центробежные силы, силами тяжести можно пренебречь. Поэтому фильтр можно располагать под каким угодно углом в пространстве, горизонтально или вертикально.

Эжекционная циркуляция шламового потока позволяет добиться почти сухого (20–30 % влажности) выхода загрязнений, что в разы сокращает площадь под их складирование и улучшает экологию окружающей среды.

6 Параметры ГД-фильтров нового поколения

Каждый элемент ГД-фильтра должен получить расчетное обоснование своих конструктивных параметров.

Попадая в фильтр, входящий поток встречается с обтекателем 4. Обтекатель обеспечивает повышение скорости движения рабочей жидкости в рабочей полости 5. Это позволяет заметно улучшить эффект гидродинамического смыва загрязнений с поверхности фильтроэлемента 6 и повысить абсолютную тонкость очистки. Постоянство скорости движения жидкости относительно фильтроэлемента 6 дает неизменную тонкость очистки по всей его площади и улучшает работоспособность фильтра.

Выбор способа создания вращательной компоненты движения потока жидкости имеет большое значение. Экспериментальному и теоретическому изучению гидродинамики и тепломассообмена вихревых течений посвящено огромное количество работ. Однако из-за большого разнообразия вихревых устройств и направленности многих исследований на изучение процессов в конкретных аппаратах их нельзя в настоящее время считать окончательно завершенными.

Поле центробежных сил можно, как известно, создавать различными устройствами: за счет вращения корпуса фильтра (роторный способ) или за счет закрутки потока относительно стенок фильтра (вихревой способ). Устройства такого типа называют завихрителями, и они имеют простую и более надежную конструкцию.

Завихритель 7 создает вращение потока жидкости относительно оси фильтроэлемента 6, что улучшает качество очистки жидкости и позволяет за счет центробеж-

ных сил отбросить частицы загрязнений от поверхности сетки фильтроэлемента.

Завихритель для фильтра должен удовлетворять целому комплексу требований, из которых, помимо обычных конструктивных (минимум массы и габаритов, простота, удобство монтажа и обслуживания и пр.), главнейшие:

- обеспечить равномерную закрутку поступающего потока флюида по всему сечению, т. е. выполнить условие постоянства угловой скорости;

- исключить резкие перепады скоростей и ускорений по оси потока, что гарантирует отсутствие срыва потоков и возникновения застойных зон;

- до минимума снизить перепад давления на фильтре, затраты энергии на перемешивание потоков жидкости, трение и гидравлическое сопротивление;

- удобно сопрягаться с обтекателем, не изменять конструкцию фильтра и не увеличивать его габариты.

Если завихритель выполнить, как обычно, в виде винтовой (геликоидальной) поверхности, у которой угол закрутки потока постоянный, то при попадании элементарной струйки на эту поверхность возникает гидроудар, когда вначале завихрителя параметры углового движения меняются скачком

$$\varphi = d\varphi / dt = \dot{\varphi} = 0 \text{ и } d^2\varphi / dt^2 = \ddot{\varphi} \rightarrow \infty, \quad (6)$$

а затем остаются постоянными

$$\varphi = \text{var}; \quad d\varphi / dt = \dot{\varphi} = \text{Const}; \quad \ddot{\varphi} = 0, \quad (7)$$

что не оправдано с позиций энергетических затрат.

Поэтому нужно стремиться к тому, чтобы завихритель плавно менял направление входящего потока жидкости при условии создания требуемого угла поворота при входе его в рабочую полость. Отсюда можно записать следующие условия для контура лопатки завихрителя на произвольной цилиндрической $\varphi = f(z)$ поверхности (рис. 5) радиуса $r = \text{Const}$:

$$0 \leq z \leq z_z; 0 \leq \varphi \leq \varphi_z, \quad (8)$$

при $\varphi = 0 \quad d^2\varphi / dz^2 = d\varphi / dz = 0.$

Эти условия равносильны требованию постепенного возрастания угла наклона лопатки и его второй производной по координате z . Среди всех возможных наиболее простым будет дифференциальное уравнение, удовлетворяющее граничным условиям (9):

$$d^2\varphi / dz^2 = az, \quad (9)$$

где a — некоторая постоянная, которая зависит от длины лопатки завихрителя по координате z .

Решение уравнения (9) дает профиль лопатки завихрителя, удовлетворяющий поставленным условиям (8):

$$\varphi = kz^3, \quad (0 \leq z \leq z_z). \quad (10)$$

Таким образом, одна из возможных форм лопатки завихрителя должна удовлетворять уравнению кубической параболы.

Рассмотрим вклад центробежных сил в работу ГД-фильтра. При движении во вращающемся криволинейном потоке жидкости частицы загрязнений находятся главным образом под действием центробежной силы, силы выталкивания воды (Архимеда) и силы сопротивления движению (Стокса), тогда как силами тяжести можно пренебречь. Частицы двигаются вместе с потоком, поэтому их вращательная и осевая скорости совпадают с полной скоростью потока.

Под действием центробежной силы частицы начинают двигаться в радиальном направлении к стенкам фильтра, преодолевая вязкое сопротивление жидкости.

Поскольку критерий Рейнольдса для такого движения невысок ($Re < 103$), можно применить для оценки силы вязкого сопротивления жидкости движению частицы закон Стокса:

$$F_C = 3\pi \cdot d \cdot \mu \cdot v_r, \quad (11)$$

где d — диаметр частицы, м;

μ — динамическая вязкость жидкости, Па·с;

$v_r = dr / dt$ — радиальная скорость частицы, м/с;

r — радиальная координата частицы.

Кроме того, на частицу будет действовать центробежная сила $F_{ц}$, которая, с учетом выталкивающей силы Архимеда, равна

$$F_{ц} = V_z \cdot (\rho_z - \rho_{жс}) \cdot \frac{v_\varphi^2}{r}, \quad (12)$$

где V_z — объем частицы загрязнений с приведенным диаметром d :

$$V_z = \frac{\pi d^3}{6}. \quad (13)$$

При равенстве сил (11) и (12) частица будет двигаться равномерно с постоянной скоростью v_* . Для этого приравняем (11) и (12) и с учетом (13) получим:

$$\pi d^3 (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{v_\varphi^2}{r} = 18\pi \cdot d \cdot \mu \cdot v_*. \quad (14)$$

Отсюда предельная радиальная скорость частицы v_* равна

$$v_* = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 \cdot v_\varphi^2}{18 \cdot \mu \cdot r}. \quad (15)$$

Поскольку частицы непрерывно перемещаются в радиальном направлении, то величина их радиальной координаты r возрастает, и поэтому их предельные радиальные скорости v_* равны производной

$$\frac{dr}{dt} = v_* = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 \cdot v_\varphi^2}{18 \cdot \mu \cdot r}. \quad (16)$$

Уравнение (16) представляет собой обыкновенное дифференциальное уравнение относительно переменной $r=f(t)$ первого порядка, которое после разделения переменных решается прямыми квадратурами:

$$\int_{R_1}^{R_2} r dr = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 \cdot v_\varphi^2}{18 \cdot \mu \cdot r} \int dt. \quad (17)$$

Решение (17) дает:

$$R_2^2 - R_1^2 = (\rho_z - \rho_{жс}) \frac{d^2 V_\phi^2}{9\mu} t. \quad (18)$$

Для каждой частицы диаметром d и объемным весом ρ_z можно найти время ее прохождения от радиуса R_1 до радиуса R_2 :

$$t(R_1, R_2) = \frac{9\mu}{d^2 \cdot V_\phi^2} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{\rho_z - \rho_{жс}}. \quad (19)$$

Большой практический интерес представляет собой задача определения такого диаметра $d_{Ц}$ частицы, которая, благодаря центробежной силе, проходит весь путь в фильтре от радиуса R_o обтекателя 4 до радиуса R_k стенки 1 корпуса, минуя фильтроэлемент 6. Из (19) получаем

$$d_{Ц} = \frac{3}{v_\phi} \sqrt{\frac{\mu}{t_L} \cdot \frac{R_k^2 - R_o^2}{\rho_z - \rho_{жс}}}, \quad (20)$$

где t_L — время движения частицы в поле центробежных сил на дину фильтра L , с.

Таким образом, все частицы загрязнений заданной плотности ρ_z с диаметром, большим $d \geq d_{Ц}$, отделяются центробежными силами и скользят по стенкам корпуса фильтра, не достигая сетки фильтроэлемента 6, а затем проходят через кольцевой канал 8 и инжекционный патрубок 13 в шламоловушку 9.

Остальные частицы загрязнений с диаметром $d < d_{Ц}$ последовательно, по мере поступательного движения в рабочей полости 5 и увеличения их диаметра d , входят в контакт с сеткой фильтроэлемента 6. На ней происходит разделение частиц в соответствии с заданной тонкостью очистки d_{\min} . Отметим, что тонкость фильтрации d_{\min} , ранее определяемая только условиями гидродинамического взаимодействия частиц с сеткой фильтроэлемента, при учете действия центробежных сил на

все частицы заметно повышается по сравнению с обычными ГД-фильтрами. Этому способствует прохождение некоторой доли частиц $d < d_{\min}$ мимо фильтроэлемента прямо в кольцевой канал.

Остальные частицы с размерами $d < d_{\min}$ проходят через сетку фильтроэлемента в фильтрат на выход 3 из фильтра, тогда как частицы размером $d \geq d_{\min}$ попадают в шламоловушку 9.

7 Численные оценки параметров ГД-фильтров нового поколения

Проведем численные оценки показателей нового ГД-фильтра средней производительности $Q = 280 \text{ м}^3/\text{ч}$, у которого:

– внутренний диаметр трубопровода $D = 0,2 \text{ м}$, его площадь $A = 0,031 \text{ м}^2$, а скорость движения жидкости $v = 2,5 \text{ м/с}$;

– площадь и диаметр обтекателя $A_o = 0,1 A = 0,003 \text{ м}^2$; $d_o = 0,063 \text{ м}$;

– угол закрутки потока в завихрителе $\varphi_z = 45^\circ$, угловая скорость потока после завихрителя $\omega = 25 \text{ с}^{-1}$;

– длина фильтра $L_f = 4D = 0,8 \text{ м}$, угол наклона фильтроэлемента $\alpha = 4,9^\circ$; время скольжения частиц загрязнений вдоль фильтроэлемента $t_f = L_f/v_z = 0,32 \text{ с}$;

– динамическая вязкость жидкости при 20°C $\mu = 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$; коэффициент загрязненности потока твердыми частицами $\varepsilon = 3\%$; поток шлама с 50%-ной влажностью $Q_z = 16,8 \text{ м}^3/\text{ч}$;

– диаметр инжекторного патрубка в канал 8 $d_z = 0,05 \text{ м}$; диаметр инжекторного патрубка из шламонакопителя $d_i = 0,05 \text{ м}$.

Подставляя в формулу (20), получим размер частиц, выше которого они не попадают на фильтроэлемент данного ГД-фильтра:

$$d_{Ц} = \begin{cases} 0,08 \text{ мм} \\ 0,15 \text{ мм} \end{cases} \text{ при } \rho = \begin{cases} 7800 \text{ кг/м}^3, \\ 2500 \text{ кг/м}^3. \end{cases}$$

Это резко увеличит работоспособность и длительность эксплуатации ГД-фильтра. Заметим, что полученные оценки $d_{Ц}$ от-

носятся лишь к тем частицам, которые перед завихрителем двигались по центру входного потока. На самом деле дополнительно и частицы меньшего диаметра, которые двигаются не по центру потока жидкости, будут отброшены к стенке фильтра и попадут в шламоотстойник, минуя фильтроэлемент.

В качестве примера возьмем ГД-фильтр сверхвысокой производительности $Q=4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ с диаметром трубопровода $0,7\text{м}$ и для той же жидкости. На рисунке 7 показаны графики изменения минимального диаметра $d_{ц}$ частиц загрязнений разной плотности в зависимости от радиуса их попадания во входной поток жидкости.

Графики показывают, что по мере возрастания радиуса R_2 все меньшего диаметра частицы загрязнений имеют вероятность попадания на фильтроэлемент, причем их число прямо пропорционально квадрату радиуса.

Чем больше плотность грязевых частиц, тем меньше их попадает и ударяет по сетке фильтроэлемента. В частности, для ГД-фильтров сверхвысокой производительности ($4000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более) даже без фильтроэлемента гарантирована очистка жидкости от частиц более $0,33 \text{ мм}$ при сбросе жидкости в пределах $2-4 \%$.

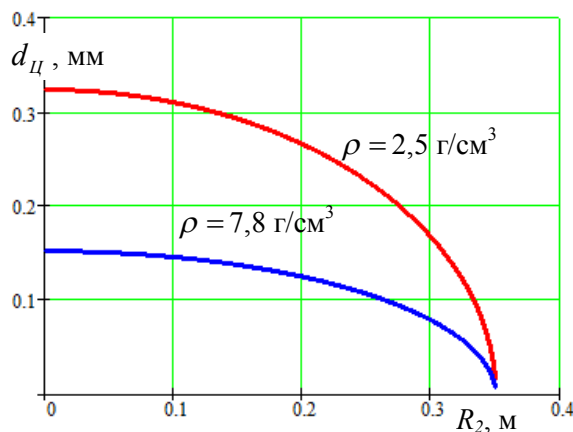


Рисунок 7 Зависимости диаметра частиц $d_{ц}$, не попадающих на фильтроэлемент, от расстояния до центра потока жидкости R_2

Важно отметить, что благодаря прямо-точности потока и низкой потере давления предлагаемый ГД-фильтр позволяет использовать самую прогрессивную систему очистки жидкости (газа) [3] путем его установки на подающих (всасывающих) гидромагистралях перед насосами и вентиляторами без риска появления кавитации.

Выводы

На основании выполненных оценок технических показателей и конструктивных параметров ГД-фильтров нового технического уровня можно заключить, что их высокую эффективность обеспечивают:

- прямоточность потока жидкости и возможность вписать фильтр в стандартные размеры обычных трубопроводов;
- обтекатель, повышающий скорость потока в рабочей полости и создающий радиальную компоненту скорости для частиц загрязнений в центре потока;
- завихритель потока, который отбрасывает большинство частиц загрязнений мимо фильтроэлемента и у которого профиль лопаток выбран так, чтобы не допустить скачков скорости потока, что минимизирует затраты энергии;
- кольцевой канал, формирующий в виде вихря грязевой поток перед шламоловушкой;
- принципиально новая шламоловушка с использованием инжекционного и эжекционного струйных насосов, которые отделяют шлам и его жидкую фазу через фильтроэлемент и позволяют получать любую, вплоть до жесткой, консистенцию шлама.

В результате применения ГД-фильтров нового технического уровня можно значительно улучшить системы очистки жидкостей от взвешенных твердых частиц (примесей, загрязнений). Перспективным является применение новых ГД-фильтров для очистки газов, в частности вместо циклонов. Предлагаемые фильтры можно с успехом использовать в машиностроительной, химической, горной, металлургической, нефтеперерабатывающей и других областях промышленности.

Данную работу автор посвящает памяти профессора З. Л. Финкельштейна, основателя научной школы гидромеханики в ДонГТИ, известного ученого в области рабочих и смазочных жидкостей.

Библиографический список

1. Финкельштейн, З. Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин [Текст] / З. Л. Финкельштейн. — М. : Недра, 1986. — 232 с.
2. Бродский, Г. С. Фильтры и системы фильтрации для мобильных машин [Текст] / Г. С. Бродский. — М. : Гемос, 2004. — 360 с.
3. Бондаренко, В. П. Системы гидродинамической очистки жидкостей от механических примесей в потоке // Современные научные исследования и инновации. — 2012. — № 3. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://web.snauka.ru/issues/2012/03/10598> (05.08.2022).
4. Финкельштейн, З. Л. Опыт применения фильтров сверхвысокой производительности для очистки промышленных стоков [Текст] / З. Л. Финкельштейн, Л. З. Финкельштейн // Вестник МАНЭБ. — СПб. : Изд-во МАНЭБ, 2003. — Т. 8. — № 5 (65). — С. 94–97.
5. Чебан, В. Г. Преимущества, недостатки и перспективы самоочищающихся очистителей жидкости [Текст] // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск : ДонГТУ, 2010. — Вып. 30. — С. 177–183.
6. Литвинский, Г. Г. Обоснование критериев технической эффективности объемных гидромашин [Текст] / Г. Г. Литвинский // Промышленная гидравлика и пневматика. — 2011. — № 2 (32). — С. 24–26.
7. Литвинский, Г. Г. Критерии оценки технического уровня горной техники [Текст] / Г. Г. Литвинский // Уголь Украины. — 2015. — № 9. — С. 41–46.
8. А.с. 161894 RU U1, МПК³ В 01 D 24/46. Гидродинамический фильтр / О. В. Федотов, З. Л. Финкельштейн, А. А. Пирожник ; КГМИ (Украина). — № 161894 ; заявл.08.10.215 ; опубл. 10.05.16, Бюл. № 13.
9. Пат. 96546 Украина, МПК В01D 27/08, В01D 29/11. Фильтр гидродинамический прямоточный / Г. Г. Литвинский, Г. П. Ковалев, З. Л. Финкельштейн. — № а201015715 ; заявл. 10.06.11 ; опубл. 10.11.11, Бюл. № 21.

© Литвинский Г. Г.

Рекомендована к печати зам. директора РАНИМИ АН ДНР д.т.н., проф. Дрибаном В. А., к.т.н., доц., зав. каф. ПГМ им. З. Л. Финкельштейна ДонГТИ Чебаном В. Г.

Статья поступила в редакцию 01.10.2022.

Doctor of Technical Sciences, Prof. Litvinsky G. G. (DonSTI, Alchevsk, LPR)

DIRECT-FLOW CENTRIFUGAL HYDRODYNAMIC FILTERS WITH EJECTION SLUDGE RECIRCULATION

The substantiation of relevance is given and a critical analysis of using the hydrodynamic filters (HD-filters) is performed. Their constructive advantages are shown and their disadvantages are discussed. The requirements for HD-filters are formulated and criteria for their economic and technical efficiency are proposed. The designs and operation of modern HD-filters, including a new technical level, are considered. A comparison of the technical indicators of existing and new HD-filters is carried out, the possibilities of their noticeable improvement are considered. A new design of a direct-flow centrifugal HD-filter with ejection sludge recirculation is proposed, and the principles of its operation are described. Special attention is paid to the work of a fundamentally new method of sludge removal based on injection and ejector jet pumps in a sludge trap that create sludge recirculation. The calculated performance indicators of the inlet flow swirler are given and the conditions of liquid purification due to centrifugal forces are estimated.

Key words: filter, hydrodynamic cleaning, filter element, fineness of cleaning, filter efficiency criteria, flow straightness, fairing, swirler, swirler blade profile, mud flow, sludge, sludge trap, sludge recirculation, sludge ejection and injection.