

*к.т.н. Бревнов А.А.
(ДонГТУ, г.Алчевск, Украина, abrevnov@list.ru)*

ОБЩАЯ МЕТОДИКА РАСЧЕТА ФИЛЬТРА, ИСПОЛЬЗУЮЩЕГО ЗАКРУТКУ ПОТОКА В КОМБИНАЦИИ С НЕПОДВИЖНЫМ СЕТЧАТЫМ ФИЛЬТРОЭЛЕМЕНТОМ

Розглянуто питання обґрунтування конструкції та створення загальної методики розрахунку фільтра, що використовує закрутку потоку в робочій порожнині у поєднанні з нерухомим фільтроелементом, для покращення умов очищення рідин, шляхом гідродинамічного ефекту.

***Ключові слова:** гідродинамічний фільтр, гідродинамічний ефект, фільтроелемент, закрутка потоку, швидкість рідини, гідравлічний опір.*

Рассмотрен вопрос обоснования конструкции и создания общей методики расчета фильтра, использующего закрутку потока в рабочей полости в сочетании с неподвижным фильтроэлементом, для улучшения условий очистки жидкостей, за счет гидродинамического эффекта.

***Ключевые слова:** гидродинамический фильтр, гидродинамический эффект, фильтроэлемент, закрутка потока, скорость жидкости, гидравлическое сопротивление.*

Введение. Для эффективной работы современных металлургических предприятий необходимость в больших объемах технических жидкостей приводит к многократному использованию имеющихся ограниченных водных ресурсов в оборотном цикле. Повторное использование жидкостей в производственном процессе приводит к постепенному их засорению, и как следствие, их обязательной очистке от различного рода примесей.

Требования к чистоте рабочих и охлаждающих жидкостей заставляют выдерживать качество жидкостей на определенном уровне, что возможно только при условии применения высокоэффективных устройств очистки, а это, в свою очередь, удорожает стоимость конечного продукта производства. Уменьшить стоимость очистки можно за счет поиска новых, не менее эффективных, в сравнении с имеющимися, но менее дорогих методов улучшения качества технических жидкостей.

Анализ последних достижений и публикаций. Обобщение результатов испытаний различных устройств очистки жидкостей, исполь-

зубаемых на промышленных предприятиях [1], [2], показало, что, к примеру, гидроциклоны эффективны лишь при разделении фаз с концентрацией взвешенных веществ 0,8-1 г/л и более. Причем, эффект очистки приближается к 100% при содержании твердого в питании 7 г/л и более. Кроме того, большой перепад давления и невозможность работы в напорных линиях являются серьезными ограничивающими факторами.

Одними из наиболее простых и эффективных устройств очистки являются сетчатые фильтры, но им присущ основной недостаток, существенно ограничивающий ресурс их работы, а именно – быстрое засорение сетки. Поэтому эффективное использование таких фильтров возможно за счет дополнительного использования каких-либо вспомогательных факторов, таких как, например, закрутка потока.

В работе [2] показано, что в результате испытаний комбинированных сетчатых и гидроциклонных установок на воде при размерах ячеек сетчатого полотна, равных 0,25×0,25 мм определенного эффекта очистки воды на них достичь можно лишь применительно к весьма грубодисперсным примесям, и сделан вывод о том, что повышение их эффективности возможно с применением сетчатых полотен с размером ячеек не более 0,05...0,1 мм и улучшением гидродинамических условий закрутки потока.

Постановка проблемы. Для определения способов улучшения гидродинамики жидкости в рабочей области необходимо исследовать поведение жидкости и взвешенных в ней частиц примесей.

Разработанный приближенный метод решения уравнений движения жидкости [3] позволяет определить поле скоростей несущей жидкости в кольцевом зазоре между двумя коаксиальными цилиндрами, что дает возможность проследить поведение твердых частиц примесей в этой области для создания рациональной конструкции устройства очистки.

Рассмотренный в работе [4] метод определения траекторий твердых частиц примесей в рассчитанном поле скоростей позволяет сделать вывод о том, что за счет закрутки потока можно не допустить к сетке твердые частицы, соизмеримые с величиной ячеек или больше этого размера. Кроме того, наличие тангенциальной составляющей скорости частицы вблизи проницаемой поверхности позволяет не пропускать сквозь сетку твердые частицы несколько меньше размеров ячеек за счет гидродинамического эффекта.

Эти результаты подтверждают возможность расчета и разработки устройства очистки жидкостей от механических примесей, с тонкостью очистки 15-50 мкм.

Целью настоящего исследования является разработка методики расчета гидродинамического неполнопоточного фильтра с неподвижным сетчатым фильтроэлементом, использующего закрутку потока.

Основная часть. Конструкция предлагаемого устройства очистки, использующего закрутку потока в сочетании с проницаемой перегородкой представлена на рисунке 1.

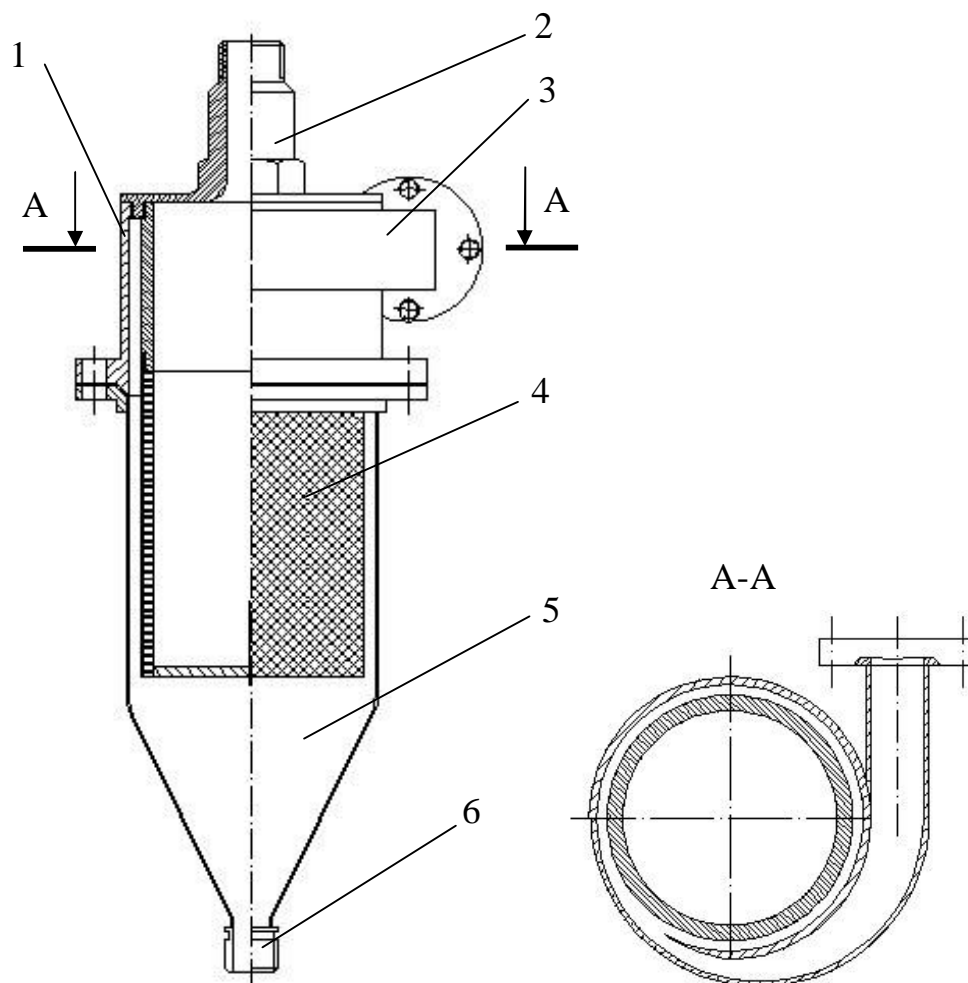


Рисунок 1 Схема устройства очистки жидких сред от механических примесей

Фильтр состоит из цилиндрического корпуса 1, патрубка отвода очищенной жидкости 2, патрубка тангенциального подвода очищаемой жидкости 3, цилиндрического фильтроэлемента 4, бункера 5 для осажденных частиц загрязнений и сливного отверстия 6 для удаления загрязнений.

Фильтр работает следующим образом. Жидкость, подлежащая очистке, подается тангенциально на вход фильтра через патрубков 3, за счет чего достигается начальная закрутка потока. Закрученный поток попадает в кольцевую область фильтрования между корпусом 1 и фильтроэлементом 4, где происходит постепенный отсос жидкости. Очи-

щенный поток из фильтроэлемента 4 подается на выход через патрубок 2 отвода очищенной жидкости, а часть неочищенной жидкости, проходя вдоль поверхности фильтроэлемента, попадает в бункер для сбора загрязнений 5. Удаление осадка из бункера 5 происходит через сливное отверстие 6.

Закрутка потока, в результате которой на частицы жидкости действует объемное поле центробежных сил, позволяет, за счет соответствующего подбора конструктивных параметров, обеспечить отсутствие возможности контакта с сеткой частиц примесей, соизмеримых с ячейками сетки или крупнее. В то же время основная тонкость очистки достигается за счет гидродинамического эффекта, обусловленного тангенциальной составляющей скорости частицы на подходе к сетке.

Существенным моментом в конструкции разрабатываемого фильтра является подбор конструктивных параметров, позволяющих добиться отбрасывания твердых частиц, соизмеримых с размером ячейки сетки и более, от проникаемой поверхности. Это важный момент, так как именно такие частицы являются наиболее опасными в смысле засорения сетки. Кроме того, непопадание на сетку частиц определенного размера приводит к уменьшению концентрации загрязнений в области сетки, т.е. в зоне действия гидродинамического эффекта.

Для того чтобы оценить в первом приближении, в каком диапазоне конструктивных параметров очистка от механических примесей определенной крупности будет эффективной, можно провести оценку соотношения геометрических параметров фильтра и требуемого расхода при заданной тонкости очистки, из условия равновесия сил, действующих на взвешенную твердую частицу в радиальном направлении.

Условия равновесия, когда сумма указанных выше сил будет равна нулю, дает возможность определить минимальный размер твердой частицы заданной плотности, которая гарантированно не попадет на поверхность фильтроэлемента:

$$-\frac{33}{8} \cdot \vartheta \cdot \pi \cdot d_p \cdot \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot L \cdot A'_0} \cdot \rho - \frac{w^2}{R_1} \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} + \frac{w^2}{R_1} \rho_p \frac{\pi \cdot d_p^3}{6} = 0, \quad (1)$$

где ϑ - кинематическая вязкость жидкости;

Q - расход жидкости;

ρ - плотность жидкости;

d_p - диаметр твердой частицы;

ρ_p - плотность твердой частицы;

R_1 - радиус фильтроэлемента;

L - длина проникаемой поверхности;

w -- тангенциальная скорость жидкости;

A'_0 – коэффициент живого сечения фильтроэлемента, равный отношению площади всех отверстий в фильтровальной поверхности к ее общей площади.

Из полученного равенства можно вывести зависимость максимального расхода через фильтр от радиуса фильтроэлемента при различных значениях окружной скорости:

$$Q = \frac{32 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot R_1 \cdot d_p^2 \cdot A'_0 \cdot (\rho_p - \rho)}{99 \cdot g \cdot \rho}. \quad (2)$$

С другой стороны, твердая частица, которая преодолела действие центробежной силы и приблизилась к сетке, находится под влиянием сил со стороны потока жидкости, как в радиальном, так и в окружном направлении.

Используя упрощенную модель гидродинамического фильтрования [5] можно определить максимальный расход жидкости через фильтр, при котором частица определенного диаметра не должна пройти сквозь ячейку фильтроэлемента:

$$Q = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_1 \cdot L \cdot A'_0 \cdot A''_0 \cdot w \cdot d_p}{2a}, \quad (3)$$

где A''_0 – коэффициент живого сечения фильтровальной сетки;

a – размер ячейки фильтровальной сетки.

Анализ зависимостей (2), (3) дает возможность подобрать, в первом приближении, рациональные параметры работы гидродинамического фильтра, использующего закрутку потока на входе. При этом твердые частицы определенной плотности, соизмеримые с размером ячейки сетки не подходят к сетке за счет действия центробежной силы, в то же время частицы более мелкие попадают на сетку, но не проходят сквозь ячейку за счет действия гидродинамического эффекта.

На основании проведенного предварительного исследования по определению области рациональных параметров разрабатываемого устройства очистки жидкостей от механических примесей, использующего закрутку потока в сочетании с наличием фильтровальной перегородки можно рассчитать его основные параметры.

Критерием полной работы фильтровальной сетки является отсутствие обратных течений в зоне фильтрования. Это можно обеспечить за счет протока части очищаемой жидкости в линию сброса.

В конструкции гидродинамического неполнопоточного фильтра [5] часть жидкости, подаваемая на сброс, необходима для обеспечения гидродинамической очистки. При этом область фильтрования выполне-

на в виде сужающегося кольцевого зазора для обеспечения постоянной в разных сечениях скорости течения жидкости.

В случае использования закрутки потока необходимость в сужающемся кольцевом канале отпадает из-за того, что тангенциальная составляющая скорости потока, которая является основной для работы гидродинамического эффекта, затухает очень медленно [6].

Наличие протока жидкости в конечных сечениях области фильтрации можно оценить по распределению скоростей в исследуемой области.

На основании анализа закручивающих устройств [7] нужно принять завихритель какого-либо типа. К примеру, одним из наиболее простых закручивающих устройств можно принять улиточный завихритель с одним каналом.

Затем можно приступить к расчету поля скоростей и давлений в области фильтрации, для чего необходимо задать некоторые исходные данные.

Распределение вращательной скорости принимаем по закону твердого тела, что часто используется в практических решениях [7]

$$w(r) = \omega \cdot r. \quad (4)$$

Величину угловой скорости ω можно определить из закона сохранения момента количества движения для объема жидкости во входном канале и в кольцевом зазоре. При этом мы пренебрегаем потерями на вязкое трение. Как показано в работе [7], на основе экспериментальных исследований, погрешность подобного допущения не превышает 13%.

Изменение величины осевой скорости от значений во входном патрубке до величины скорости во входном сечении области фильтрации можно учесть с помощью уравнения моментов количества движения:

$$\rho \cdot Q \cdot V_{ex} r_{ex} = 2\pi\rho \int_{R_1}^{R_2} w_0(r) \cdot u_0(r) \cdot r^2 dr, \quad (5)$$

где Q – расход через фильтр;

V_{ex} – средняя скорость жидкости во входном патрубке;

r_{ex} – расстояние от оси фильтра до оси входного патрубка;

$u_0(r)$, $w_0(r)$ – соответственно осевая и тангенциальная скорость в начальном сечении при текущем положении радиальной координаты r .

Величину осевой скорости определяем как среднерасходную в начальном сечении.

В работе [3] получена система дифференциальных уравнений для определения трех компонент скорости жидкости в исследуемой кольцевой области:

$$u'' = u' \cdot \left(\frac{v(r)}{g} - \frac{1}{r} \right) + u^2 \frac{1}{g \cdot \Delta z} - u \frac{u_0}{g \cdot \Delta z} + \frac{1}{g \cdot \rho} \cdot \frac{dp_1}{dz}, \quad (6)$$

$$v_{i+1} = v_i \cdot \frac{r_i}{r_{i+1}} - \frac{r_i [u(r_i) - u_0(r_i)] + r_{i+1} [u(r_{i+1}) - u_0(r_{i+1})]}{2 \cdot r_{i+1} \cdot \Delta z} \Delta r_i, \quad (7)$$

$$w'' = \left(\frac{v}{g} - \frac{1}{r} \right) w' + \left(\frac{v}{r \cdot g} + \frac{1}{r^2} + \frac{u}{g \cdot \partial z} \right) w - \frac{u}{g} \cdot \frac{w_0}{\Delta z}, \quad (8)$$

$$p_1 = - \frac{\mu \cdot \int_{R_1}^{R_2} r \frac{\partial u}{\partial z} dr}{\lambda \cdot R_1}, \quad (9)$$

где Δz – шаг по оси z ;

v_i, v_{i+1} – радиальная скорость, соответственно, на текущем и последующем шаге по координате r ;

λ – коэффициент проницаемости поверхности, представляющий собой удельную пропускную способность единицы площади фильтрующей поверхности при перепаде давления в 1 Па и вязкости в 1 Па с;

μ – динамическая вязкость жидкости, Па с;

p_1 – давление на проницаемой поверхности.

Численное решение уравнений (6)-(9) дает возможность подобрать геометрические размеры кольцевого канала с проницаемой внутренней поверхностью, в котором обеспечивается, по крайней мере, 5% сброс жидкости от общего расхода через проектируемое устройство очистки.

На основе полученного численного решения упрощенных уравнений Навье-Стокса в итерационном цикле (6)-(9) определяем величину кольцевого зазора из условия отсутствия признаков появления обратных течений. Путем повторных расчетов получаем картину распределения трех компонент скорости потока и распределение давления в области фильтрования. Расчет необходимо производить до тех пор, пока при определенной угловой скорости не будут возникать предвестники отрыва потока.

После этого, воспользовавшись программой расчета траекторий движения твердых частиц в рассчитанном поле скоростей [4] нужно определить траекторию частиц заданной плотности ρ_p .

В случае если твердая частица диаметром, соизмеримым с размером ячейки сетки не попадает на внутреннюю проницаемую поверхность, следует принять ширину кольцевого зазора меньше предыдущего варианта, для которого опять нужно найти такую угловую скорость закрутки потока, при которой не будут появляться признаки отрыва потока.

Далее нужно опять рассчитать траекторию движения твердых частиц в заданном поле скоростей.

Выполнять такой расчет необходимо до соблюдения следующих условий:

1. Поток в расчетной области является равномерным без признаков отрыва потока.
2. Твердая частица, соизмеримая с размером ячейки сетки, не попадая на внутреннюю поверхность, выносится из расчетной области потоком, идущим на сброс.

После этого нужно проверить возможность реализации гидродинамического эффекта по всей поверхности фильтроэлемента. Для этого нужно построить график отношения тангенциальной скорости к радиальной, на расстоянии половины диаметра частицы, определяющей тонкость очистки, из которого можно определить по наименьшему значению этого отношения, от частиц какого размера будет гарантированно очищен поток.

При полученных размерах из конструктивных соображений определяются размеры бункера, в котором осаждаются частицы загрязнений.

После того, как выполнен расчет по подбору конструктивных параметров разрабатываемого устройства очистки, необходимо провести расчет гидравлического сопротивления.

Для определения гидравлического сопротивления гидродинамического фильтра с закруткой потока определяем перепады давлений на границах характерных подобластей, на которые можно разделить всю внутреннюю область фильтра [8]. Сумма полученных значений определяет общий перепад давлений, характеризующий гидравлическое сопротивление. Потери напора складываются из потерь напора во входном патрубке, в кольцевом зазоре, на фильтрующей сетке и в выходном патрубке.

Значение гидравлического сопротивления фильтра дает возможность судить о целесообразности изготовления гидродинамического фильтра с закруткой потока. Расчеты [8] показывают, что в исследуемом диапазоне расходов очищаемой жидкости можно подобрать конст-

руктивные размеры таким образом, чтобы перепад давления на фильтре не превышал 0,01-0,015 МПа.

Выводы. Таким образом, в результате проведенного исследования на основе представленной методики расчета гидродинамического фильтра с закруткой потока можно сделать следующие выводы:

1. Существует возможность изготовить гидродинамический фильтр с закруткой потока для очистки загрязненной жидкости от твердых частиц примесей, отличающийся от известных устройств очистки простотой конструкции, небольшим перепадом давления, уменьшенным до 5% расходом на сброс, отсутствием вращающихся частей и дополнительных источников энергии.

2. Подбором конструктивных параметров можно добиться отбрасывания твердых частиц, соизмеримых с размером ячеек фильтровальной сетки, которые являются наиболее опасными в смысле забивания сетки. К тому же это позволяет уменьшить концентрацию твердых частиц в окрестности фильтровальной сетки. Более мелкие частицы не будут проходить сквозь фильтрующую поверхность за счет гидродинамического эффекта.

3. Согласно расчетам гидравлическое сопротивление разрабатываемого фильтра не превышает 0,01-0,015 МПа, что как минимум на порядок ниже, чем у противопоточных гидроциклонов.

Перспективы дальнейшего развития. Направлением дальнейших исследований является исследование гидродинамических параметров течения, а также особенностей поведения взвешенных твердых частиц в рассчитанном поле скоростей для обеспечения возможности уменьшения расхода на сброс менее 5% от общего расхода гидродинамического фильтра с закруткой потока.

Библиографический список

1. Поваров А.И. *Гидроциклоны на обогатительных фабриках* / Поваров А.И. – М.: Недра, 1978. – 232 с.

2. *Водозаборно-очистные сооружения и устройства: [Учеб. пособие для студентов вузов]* / М.Г. Журба, Ю.И. Вдовин; Ж.М. Говорова, И.А. Лушкин; Под ред. М.Г. Журбы. – М.: ООО «Издательство Астрель»: ООО «Издательство АСТ», 2003. – 569, [7] с.: ил.

3. Бревнов А.А. *Расчет поля скоростей закрученного потока в кольцевой области с проницаемой стенкой* / А.А.Бревнов, Е.В.Мочалин // *Вісник Сумського державного університету*. – 2003. - №12(58).- С.65-69.

4. Мочалин Е.В. *К постановке задачи о движении взвешенной частицы в закрученном потоке несущей жидкости между двумя соосными цилиндрами с учетом отсоса жидкости через внутренний ци-*

цилиндр / Е.В.Мочалин, А.А.Бревнов // Сб. научн. трудов ДГМИ.- Алчевск: ДГМИ, 2001. - Вып. 13. - С.210-218.

5. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин / З.Л.Финкельштейн. – М.: Недра, 1986. – 232 с., с ил.

6. Мочалин Е.В. Численное моделирование закрученного течения в кольцевом канале с проницаемыми стенками / Е.В.Мочалин // – Сборник научных трудов НИПКИ "Параметр" при ДГМИ. - Алчевск: ДГМИ, 1998. - Т.1, вып.1. - С.38-51.

7. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил: в 4 т. / А.А. Халатов, А.А.Авраменко, И.В. Шевчук. – Киев: Ин-т техн. Теплофизики НАН Украины, 2000. Т. 3: Закрученные потоки. – 2000. – 474 с.; ил. 155.

8. Бревнов А.А. Расчет гидравлического сопротивления гидродинамического неполнопоточного фильтра с закруткой потока / А.А. Бревнов // Всеукраинский научно-технический журнал «Промышленная гидравлика и пневматика». – 2010. - №4 (30). – С.46-48.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. Финкельштейном З.Л.