БЕЗОПАСНОСТЬ И НАДЁЖНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Представленной вниманию читателей публикацией журнал открывает новую рубрику "Безопасность и надежность технических и технологических систем". В рубрике будут публиковаться инженерные решения, связанные с вопросами обеспечения безопасности жизнедеятельности, надежности и безаварийности работы оборудования, машин, аппаратов. Призываем наших нынешних и будущих авторов публиковать на страницах журнала свои оригинальные инженерные решения, а также обзоры инженерных решений по отдельным проблемам обеспечения безопасности жизнедеятельности. Это могут быть внедренные, опытные инженерные решения, а также предложения авторов в виде новых конструкций машин и аппаратов, средств защиты человека и окружающей среды.

УДК 665.637.72

В. А. Девисилов, канд. техн. наук, доц., **И. А. Мягков,**
асп., МГТУ им. Н. Э. Баумана

Гидродинамическое вибрационное фильтрование и конструкции фильтров

Гидродинамическое вибрационное фильтрование позволяет достичь высокой эффективности очистки жидкостей при обеспечении больших пропускной способности и ресурса работы фильтра. В статье описан принцип действия гидродинамических вибрационных фильтров и возможные конструктивные решения, реализующие метод гидродинамического вибрационного фильтрования. Гидродинамические вибрационные фильтры могут применяться для очистки сильно загрязненных сточных вод, регенерации отработанных масел, для очистки технологических и рабочих сред, особенно эффективны для очистки высоковязких сред, а также сред, загрязненных нефтепродуктами, растворами полимеров. На основе оригинальных конструктивных решений авторами разработана конструкция опытного фильтра.

Введение

Одним из основных методов очистки жидкостей от взвешенных частиц является фильтрование, заключающееся в пропускании очищаемой жидкости через пористую перегородку. При этом на перегородке и в ее пористой структуре накапливаются загрязнения, ее пропускная способность уменьшается, и растет гидравлическое сопротивление фильтра. При высоких концентрациях взвесей, при наличии в загрязненной воде нефтепродуктов, растворенных полимеров, поверхностно-активных веществ и ряда других примесей процесс забивания фильтровальной перегородки быстр, а ее регенерация сложна. Как правило, требуется замена фильтровальной перегородки или фильтрующего материала.

Указанные проблемы очистки жидкостей методом фильтрования имеют место при очистке коммунальных и промышленных стоков, технологических жидких сред — моторных, гидравлических, индустриальных, трансформаторных и других видов масел и нефтепродуктов, фильтровании растворов и расплавов полимеров и т. д.

Фильтры также устанавливаются в технологические схемы циркуляции смазывающих, охлаждающих и рабочих жидких сред машин и оборудования. При превышении перепада давления на фильтровальной перегородке, связанного с ее забиванием улавливаемыми загрязнениями выше допустимого значения, открывается перепускной клапан, и жидкость начинает циркулировать, минуя фильтр. Это приводит к значительному снижению ресурса и надежности работы оборудования или устройства, а в ряде случаев к авариям и снижению безопасности эксплуатации машин.

В ряде технических устройств используются рабочие жидкие среды в виде суспензий; например, в электро- и магнитореологических устройствах, двигательных установках, использующих суспензионные топлива. В этих случаях задача фильтрования жидких сред традиционными фильтрами представляет наибольшую сложность или вообще невозможна и необходимо приме-

нение так называемого селективного фильтрования. Селективное фильтрование заключается в пропускании через фильтровальную перегородку всех взвешенных частиц, не превышающих определенного допустимого размера. Попадание в рабочие органы более крупных частиц, которые могут поступить в рабочую среду извне или образоваться из-за агломерации мелких частиц, приводит, как правило, к отказу машины или устройства. Для ряда устройств, например двигательных установок, это может привести к аварийным ситуациям, угрожающим жизни людей или связанным с большими материальными потерями.

Традиционные неподвижные пористые перегородки не могут решить задачу селективного фильтрования. Селективные фильтры могут быть созданы при использовании гидродинамического вибрационного фильтрования. Во многих случаях к таким фильтрам предъявляются требования компактности, малой массы, а при использовании пожаровзрывоопасных и токсичных сред — высокой степени герметичности.

Важнейшими параметрами любого фильтра являются: тонкость и эффективность очистки, гидравлическое сопротивление или пропускная способность и ресурс работы фильтроэлемента до его регенерации или замены. При создании фильтра необходимо обеспечить наибольшую эффективность, ресурс работы при обеспечении минимального гидравлического сопротивления.

В предлагаемом вниманию читателей материале рассмотрены разработанные авторами оригинальные конструктивные схемы фильтров, позволяющих решить задачу фильтрования сильно загрязненных, высоковязких жидких сред, повысить пропускную способность и ресурс работы фильтров и, при необходимости, реализовать схему селективного фильтрования суспензий.

Принцип гидродинамического вибрационного фильтрования

Одним из способов повышения пропускной способности фильтровальной перегородки и ресурса фильтроэлементов является применение самоочищающихся фильтров, т. е. фильтров, которые в процессе работы очищались бы от образующегося на поверхности фильтровальной перегородки слоя осадка загрязнения и тем самым восстанавливали свою пропускную способность. Известно, что очистка фильтровальной перегородки в процессе работы фильтра может осуществляться за счет гидродинамического смыва образующегося осадка потоком жидкости, а также за счет воздействия центробежных и вибрационных сил [1—3].

Принцип действия такого фильтра показан на рис. 1. Очистка жидкой среды осуществляется следующим образом. Часть потока очищаемой жидкости (10...15%) перепускается вдоль фильтровальной перегородки. Скорость жидкости в кольцевом зазоре между неподвижным корпусом и вращающимся фильтроэлементом уменьшается от $v_{1пх}$ до $v_{2пх}$, так как большая часть потока (85...90 %) фильтруется (отсасывается) через фильтровальную перегородку. Гидродинамическая сила $F_{пх}$, действующая на взвешенные частицы со стороны перепускаемого потока, способствует их смыву с поверхности перегородки. Сила $F_{пх}$ определяется скоростью $v_{пх}$ продольного потока жидкости, которая снижается из-за ее отсоса через фильтровальную перегородку, поэтому целесообразно, чтобы площадь кольцевого зазора между перегородкой и корпусом была уменьшающейся пропорционально убытию жидкости через перегородку. Это может быть достигнуто выполнением перегородки или внутренней поверхности корпуса (это целесообразнее) коническими. Причем площадь кольцевого зазора на выходе жидкости должна составлять около 10...20 % от его площади на входе. Достигаемое за счет этого постоянство гидродинамической силы обеспечивает одинаковую степень самоочищения перегородки на всех ее участках.

Возникающая при вращении перегородки с угловой скоростью ω центробежная сила $F_{цу}$ способствует удалению от ее поверхности частиц взвеси, обладающих большей плотностью, чем жидкая фракция.

При фильтровании высоковязких жидкостей, воды с наличием в ней примесей нефтепродуктов, высокомолекулярных веществ в порах фильтрома-

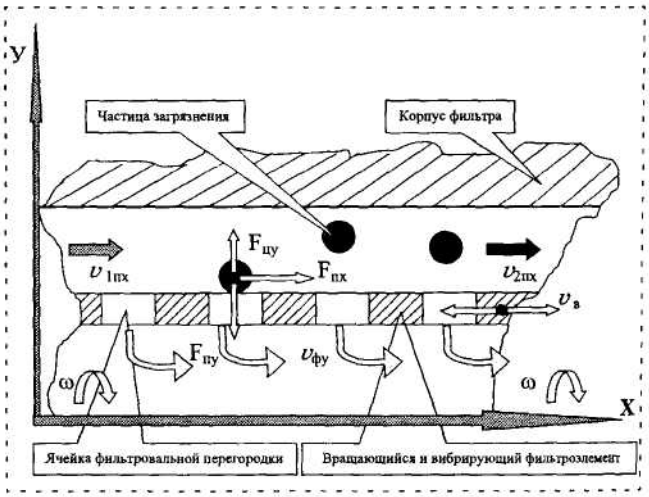

Рис. 1. Принцип действия гидродинамического вибрационного фильтра:

$v_в$ — виброскорость; $v_{фу}$, $F_{пу}$ — соответственно скорость фильтрации и гидродинамическая сила по оси y

терриала интенсивно проявляются облитерационные процессы, заключающиеся в нарастании толщины пограничного слоя и адсорбции молекул высокомолекулярных соединений на стенках порового канала, уменьшении его проходного сечения и, как следствие, пропускной способности фильтровальной перегородки.

Нашими экспериментами, а также опытами ряда других исследователей установлено, что наличие нестационарных процессов (пульсации расхода, вибрации фильтровальной перегородки) в значительной степени устраняют облитерационные и адсорбционные явления, осложняющие процесс фильтрования жидкостей.

Осуществление процесса фильтрования в нестационарных условиях особенно благоприятно при очистке неньютоновских псевдопластических жидкостей, к которым можно отнести большинство сильно загрязненных высоковязких жидкостей, суспензий, эмульсий, например, масел, нефтепродуктов, суспензионных топлив.

Поэтому в фильтрах для повышения ресурса их работы и интенсификации процесса очистки фильтровальной перегородки целесообразно создавать пульсирующие потоки очищаемой жидкости и/или вибрацию фильтроэлемента. Создаваемая вибрация фильтроэлемента может быть продольной (как показано на рис. 1, где $\upsilon_в$ — скорость продольной вибрации), поперечной и продольно-поперечной.

Конструкции гидродинамических вибрационных фильтров

Для реализации процесса гидродинамического вибрационного фильтрования жидкостей различного вида авторами разработаны разнообразные конструктивные варианты фильтров. Вибрация фильтровальной перегородки может создаваться как внешними источниками вибрации — вибраторами, которые жестко связаны с корпусом перегородки, так и потоком очищаемой жидкости, если поток обладает необходимым запасом энергии (напором). Вращение фильтроэлемента может также осуществляться как за счет внешнего привода, так и за счет напора очищаемой жидкости. Могут применяться и комбинированные конструктивные схемы, использующие одновременно напор очищаемой жидкости и внешний привод.

Фильтры с внешними источниками вибрации. Принципиальная конструктивная схема фильтра с внешним источником вибрации показана на рис. 2 [4]. Фильтр состоит из корпуса *1* с входным 2 и выходным *3* патрубками и расположенной в нем фильтровальной перегородки *4,* соединенной штоками *5* и *6* с вибоприводами *7* и *8,* расположенными вне корпуса, причем направление вибросме-

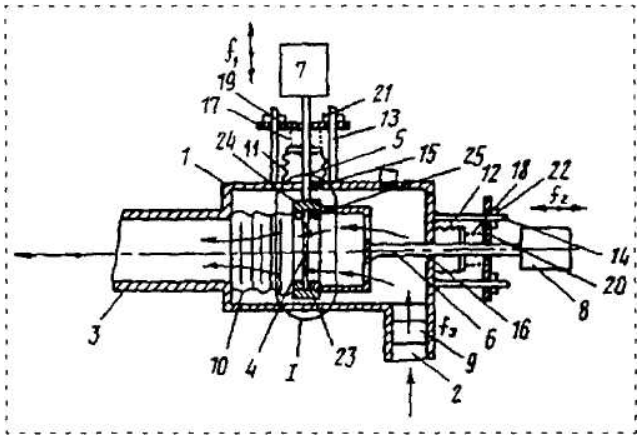

Рис. 2

щения одного из них параллельно, а другого перпендикулярно поверхности фильтровальной перегородки. Фильтр снабжен пульсатором давления *9,* который может быть выполнен в виде периодически прикрывающегося клапана или в виде вращающегося диска, периодически перекрывающего проходное сечение жиклера. Фильтр имеет три сильфона *10, 11, 12* и два упругих компенсатора *13, 14* давления. Сильфон *10* расположен внутри корпуса, разделяет входной и выходной патрубки *2, 3,* и на нем закреплена перегородка *4 с* возможностью перемещения. Сильфоны *11, 12* обеспечивают герметизацию зазоров *15, 16* между штоками *5,* 6 и корпусом *1* фильтра. Зазоры 75, *16* должны быть минимальными и выполнять функции дросселей.

Компенсаторы *13, 14* выполнены в виде пружин *17, 18* сжатия, расположены между сильфонами *11, 12* и опорными шайбами *19, 20* и стянуты винтовыми соединениями *21, 22.* Фильтр снабжен разъемной обоймой *23* в виде внешнего и внутреннего колец *24* и *25.* Во внешнем кольце *24* выполнен Т-образный паз, перпендикулярный поверхности фильтровальной перегородки. На конце штока 5 выполнен ответный Т-образный выступ, расположенный в пазу с возможностью перемещения.

При приложении вибрации к фильтровальной перегородке *4* в двух взаимно перпендикулярных направлениях происходит разрыхление слоя осадка, образующегося на перегородке. Он отходит от перегородки и становится более проницаемым. При этом устраняются облитерационные явления, и значительно снижается сорбирование молекул высокомолекулярных соединений в пористой структуре. Наложение пульсаций давления (расхода) усиливает эффект воздействия вибрации. Как показали наши эксперименты, эффективность работы устройства сильно зависит от величины час-

тот вибрации и пульсаций, а также соотношения их частот и фаз.

Компенсаторы *13, 14* настраиваются на заданное абсолютное давление на входе в фильтр посредством сжатия пружин *17, 18 с* помощью винтов *21, 22.* Этим компенсируется растяжение сильфонов *11, 12* под действием давления. Минимальные зазоры 75, *16* демпфируют колебания давления внутри сильфонов. По мере снижения пропускной способности перегородки *4* перепад давления на ней возрастает. В результате сильфон *10* сжимается, и обойма *23* с перегородкой *4* перемещается к выходному патрубку *3.* При этом Т-образный выступ свободно перемещается по пазу.

Фильтр с вращением фильтроэлемента за счет напора жидкости и внешним источником вибраций и пульсаций. На рис. 3 изображена конструктивная схема фильтра с вращающимся и вибрирующим филтроэлементом [5,6]. Вращение осуществляется за счет напора фильтруемой жидкости, а пульсация расхода и вибрация фильтроэлемента — за счет внешнего источника.

Фильтр для суспензий содержит корпус *1* с входным *2* и выходным *3* патрубками и установленный в нем вращающийся фильтровальный элемент *4* с фильтровальной перегородкой 5, расположенной с зазором б относительно стенок корпуса *1* и имеющей поверхность тела вращения. Фильтр снабжен пульсатором *7* расхода и турбиной *8* со ступицей *9* и сильфоном *10,* посредством которого фильтровальный элемент *4* закреплен на ступице *9.* Фильтровальный элемент *4* снабжен основанием *11* из сплошного материала, расположенным

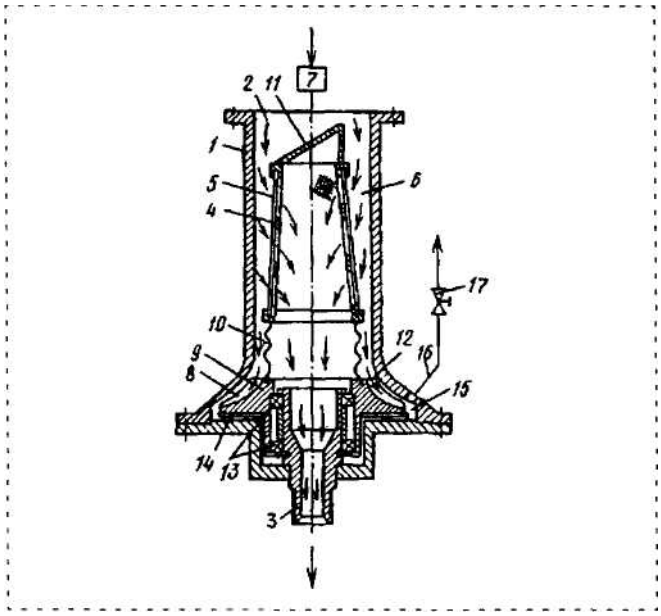

Рис.3

под углом к оси вращения элемента *4* навстречу потоку фильтруемой среды. Зазор *6* между фильтровальной перегородкой *5* и стенкой корпуса *1* сообщен с входом *12* турбины *8.* Фильтровальная перегородка 5 выполнена конической с диаметром, увеличивающимся в сторону турбины *8.* Последняя закреплена на выходном патрубке *3* посредством подшипников *13.* Турбина *8* имеет на задней стороне импеллерные лопатки *14* для гидродинамического уплотнения зазора между корпусом *1* и турбиной *8.* Выход *15* турбины *8* сообщен магистралью *16* с регулирующим вентилем 17 со сливом.

Фильтр работает следующим образом. После прохождения суспензии через пульсатор *7* создается пульсирующий расход. При прохождении суспензии через фильтровальную перегородку *5* возникает пульсирующий перепад давления, который создает периодически изменяющуюся силу, действующую на основание *11,* расположенное под углом к оси фильтроэлемента, что приводит к периодическим сжатиям упругого сильфона *10.* Так как основание *11* выполнено наклонным, то сила, действующая на него, направлена под углом к оси фильтровального элемента *4.* Эта сила разлагается на две составляющие — параллельную и перпендикулярную направлению фильтрации, что повышает производительность фильтра и его очистку.

Часть жидкости перепускается через зазор *6* на вход *12* турбины *8,* проходя через которую жидкость вращает турбину *8* и одновременно с ней закрепленный на ее ступице *9* фильтровальный элемент *4.* За счет действия центробежной силы в сочетании с вибрацией в двух направлениях (продольном и поперечном) слой осадка отбрасывается от поверхности фильтровальной перегородки 5 и смывается перепускаемой жидкостью. С выхода *15* турбины *8* жидкость направляется в сливную магистраль *16,* имеющую регулирующий вентиль *17* для управления расходом перепускаемой жидкости.

Фильтр выполнен компактным, имеет небольшие габариты и массу, обладает высокой герметичностью, что особенно важно при фильтровании пожаро- и взрывоопасных жидкостей при высоких абсолютных давлениях. Испытания показали, что сочетание продольной и поперечной вибраций повышает эффективность очистки фильтровальной перегородки, а значит и ресурс работы фильтра.

Фильтры с вращением и вибрацией фильтроэлемента (пульсацией расхода) за счет энергии потока жидкости. На рис. 4 ... 7 изображены конструктивные схемы фильтров, в которых вращение и вибрация фильтроэлемента, а в некоторых конструкциях и пульсация расхода осуществляется частично или полностью за счет энергии потока жидкости.

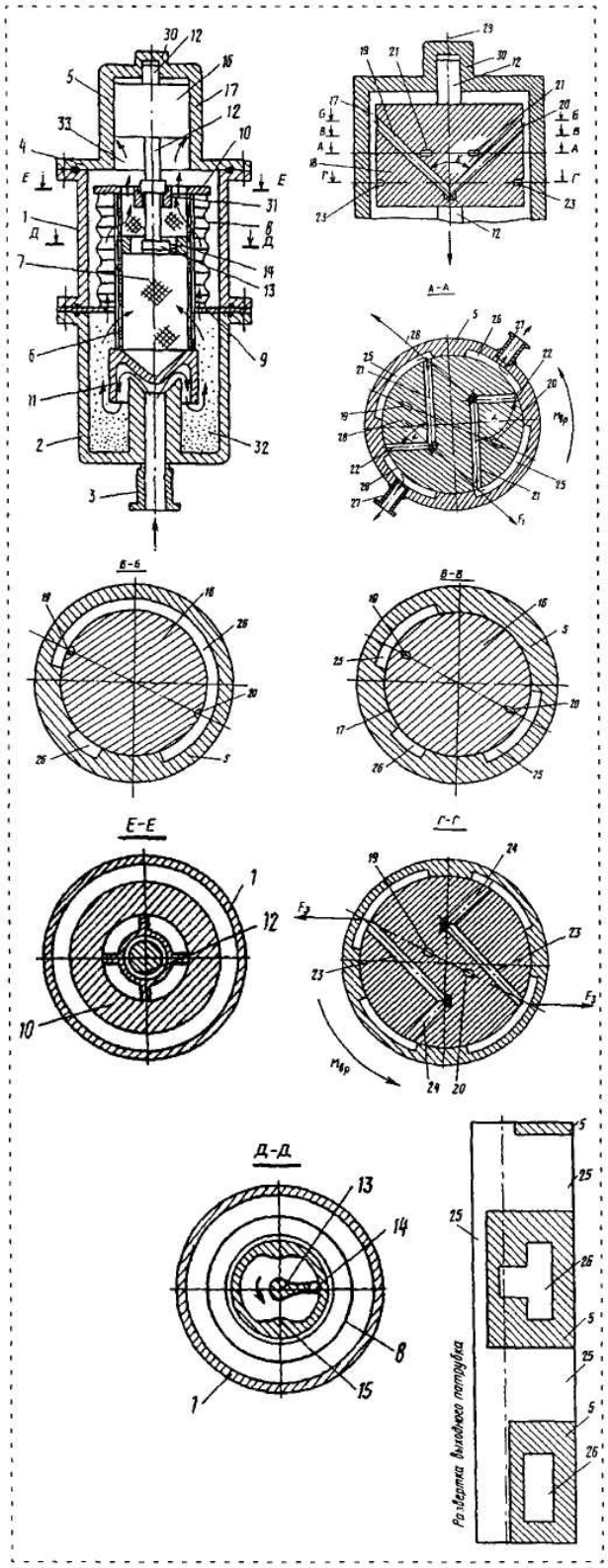

Рис. 4

Фильтр, схема которого изображена на рис. 4 [7], содержит корпус *1,* днище *2* с входным патрубком *3,* крышку *4* с выходным патрубком *5*, фильтрующий элемент *6* с фильтровальной перегородкой 7, установленный посредством сильфона *8* на перегородке *9* и снабженный в верхней части крышкой *10,* а в нижней — отбойником *11,* охватывающим входной патрубок *3,* вибратор, включающий вал *12* с толкателем *13,* взаимодействующим с фильтрующим элементом через кольцо *14* с волнообразными выступами /5, и установленный на валу *12* привод *16.*

Привод *16* выполнен в виде установленного с зазором *17* в выходном патрубке *5* ротора *18* с выполненными в нем пересекающимися каналами *19* и *20, 21* и *22, 23* и *24,* а на стенках патрубка *5* выполнены входные *25* и выходные *26* камеры.

При вращении ротора *18* указанные камеры поочередно сообщаются с входами и выходами пересекающихся каналов. Величина зазора *17* превышает максимальный размер возможных загрязнений для исключения возможного заклинивания ротора. Для отвода жидкости из выходных камер *26* установлены штуцеры *27.* Пересекающиеся каналы *21* и *22, 23* и *24* выполнены в плоскостях, перпендикулярных образующей фильтрующей перегородки, при этом в каждой плоскости расположено две пары пересекающихся каналов, вершины углов а которых направлены в противоположные стороны, а биссектрисы *28* этих углов а параллельны касательным к поверхности ротора. Каналы *23* и *24* развернуты на некоторый угол относительно каналов *22* и *21.* Такое размещение каналов в перпендикулярных плоскостях обеспечивает создание момента пары реактивных сил *F*± и *F%,* направленных в одну сторону и обеспечивающих вращение ротора и колебания фильтрующего элемента в горизонтальной плоскости.

Пересекающиеся каналы *19* и *20* выполнены в плоскости, параллельной образующей фильтрующей перегородки, при этом биссектриса *29* угла пересечения а расположена по оси вала *12,* а вершина угла направлена в сторону входного патрубка *3.* Такое размещение каналов в плоскости, параллельной образующей, обеспечивает перемещение ротора в вертикальной плоскости и соответственно колебания фильтрующего элемента в этой плоскости. Каналы *19* и *20* расположены в промежутках между каналами *21* и *22, 23* и *24.* Одна из выходных камер выполнена Т-образной. Одна из опор вала *12* выполнена осевой и размещена в приливе *30* выходного патрубка, а вторая опора *31* выполнена радиальной и размещена на фильтрующем элементе.

Фильтр работает следующим образом. Жидкость через входной патрубок *3* поступает в днище *2.* При обтекании отбойника *11* жидкость резко изменяет направление движения, при этом происходит отделение крупных частиц за счет инерционного эффекта. Отделенные частицы загрязнений собираются в кармане *32*. Затем жидкость фильтруется через фильтрующий элемент *6* в полость *33,* а затем в камеры *25,* откуда через пересекающиеся каналы ротора *18* поступает в выходные камеры *26* и далее через штуцеры *27* выводится из фильтра.

Проходя по каналам *21* и *22, 23* и *24,* жидкость изменяет направление своего движения. В результате этого возникает реактивная сила, направленная по биссектрисе угла α поворота, которая образует в обеих плоскостях пару сил, создающих вращающие моменты. Ротор *18* под действием вращающих сил приводится во вращательное движение. При вращении ротора *18* с валом *12* толкатель *13* обкатывает выступы 75 кольца *14.* При этом фильтроэлемент *6,* закрепленный на сильфоне *8,* совершает поперечные вибрации. При вращении ротора 18 жидкость попадает в каналы *19* и *20* периодически через камеры *26* выбрасывается на выход. В результате возникает периодическая пульсирующая реактивная сила, направленная вдоль оси ротора *18.* При этом ротор совершает продольные колебания, воздействуя через вал *12* на опору *31,* закрепленную на фильтроэлементе 6.

В результате сильфон 8 периодически сжимается, а затем под действием собственной упругости разжимается, а фильтроэлемент совершает продольные колебания. Меняя количество и высоту выступов *15* на кольце *14,* можно изменять амплитуду и частоту поперечных вибраций фильтроэлемента *6.* Изменяя диаметр пересекающихся каналов в роторе *18,* можно изменять величину реактивных сил, а, следовательно, и величину вращающегося момента. Продольно-поперечные вибрации фильтроэлемента сопровождаются пульсациями перепада давления на фильтроэлементе и расхода. Пульсации расхода и давления возникают из-за того, что жидкость через каналы *19* и *20* протекает не постоянно, а периодически, когда выход каналов проходит через основание (днище) Т-образной камеры. Таким образом, гидравлическое сопротивление выходного сечения периодически изменяется, что и приводит к пульсациям расхода и давления.

Совместное действие продольно-поперечных вибраций на фильтроэлемент *6* и пульсаций расхода способствует разрыхлению слоя образующегося осадка на поверхности фильтровальной перегородки *7.* Крупные частицы загрязнений под действием сил гравитации осаждаются в карманах *32.*

Фильтр выполнен разборным, что облегчает его периодическую очистку и замену отдельных элементов, в частности фильтроэлемента *6.* Конструкция проста, не требует специальных приводных устройств для создания вибрации, что делает ее компактной и небольшой по массе. Конструкция герметична, не имеет уплотнений подвижных элементов, что повышает ее надежность при фильтровании пожаро- и взрывоопасных и токсичных сред за счет исключения их утечки из корпуса фильтра.

На рис. 5 изображена конструктивная схема аналогичного фильтра, в котором в качестве привода используется осевая турбинка [8]. Фильтр содержит корпус *1* с входным *2* и выходным *3* патрубками, расположенный в нем фильтроэлемент *4* и виброприводъ, выполненный в виде турбинки 5, например, осевого типа, расположенной в выходном патрубке *3* и установленной на валу *6,* закрепленном на опорах 7 и *8* на корпусе *1.* Фильтроэлемент *4* снабжен расположенным внутри него кольцом 9 с несколькими выступами 70 и сильфоном 77, посредством которого он закреплен на корпусе 7 с возможностью перемещения, при этом вал *6* снабжен закрепленным на его конце толкателем *12,* расположенным напротив кольца *9* с выступами *10.* Выступы *10* выполнены волнообраз-

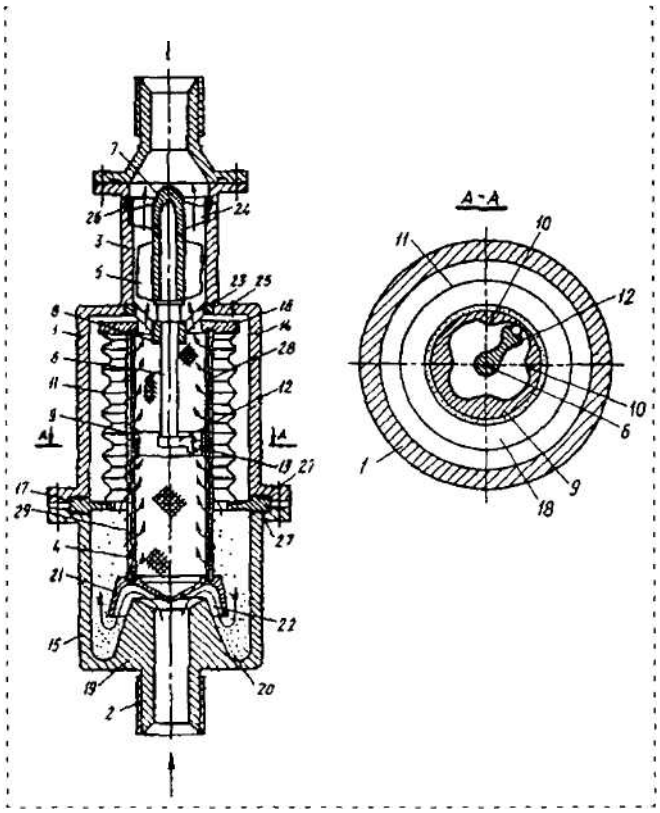

Рис. 5

ными. Толкатель *12* снабжен роликом *13,* закрепленным на его конце и контактирующим с волнообразными выступами *10.* Для повышения удобства эксплуатации и очистки фильтра и смены фильтроэлемента корпус *1* выполнен разъемным из двух половин в виде стаканов *14* и *15.* Сильфон *11* закреплен на фланцах *16* и *17,* один из которых (*16)* закреплен на верхнем торце фильтроэлемента *4* со стороны выходного патрубка *3,* а другой *(17)* установлен в разъеме корпуса *1,* при этом сильфон *11* расположен концентрично фильтроэлементу *4,* выполненному цилиндрическим, и с зазором *18* относительно его поверхности.

Корпус *1* со стороны входного патрубка *2* снабжен выступом *19* в виде усеченного конуса, образующим кольцевой карман *20* для сбора загрязнений, а фильтроэлемент *4* снабжен отбойником *21* тарельчатой формы, охватывающим с зазором *22* конический выступ *19* на корпусе *1.* Опоры *7* и *8* вала *6* турбинки 5 выполнены в виде лопаточных входного и выходного направляющих аппаратов *23* и *24.* Фильтр снабжен индикатором *25* загрязнения фильтра. Индикатор закреплен на корпусе *1* напротив фланца *16.* При фильтровании неэлектроприводных сред индикатор *25* может быть выполнен в виде электрического контакта, а при фильтровании электропроводных сред — механическим, мембранным и т. п.

Для надежной работы фильтра сильфон *11* должен выбираться достаточной длины и гибкости в зависимости от типоразмера фильтра, массы фильтроэлемента и расчетного крутящего момента турбинки *5.* Опора *8* вала *6* закреплена на корпусе *1* с помощью пайки или сварки, а опора *7* — с помощью разрезного кольца *26.* Между стаканами *14* и 75 корпуса установлены уплотнительные кольца *27,* например, из фторопласта. Фильтр выполнен полностью разборным, обеспечивающим его легкую разборку при очистке и замене вышедших из строя элементов. Фильтроэлемент *4* выполнен в виде перфорированного цилиндра *28* с металлической сетки *29.*

Работает фильтр аналогично изображенному на рис. 4. Жидкость под давлением проходит по входному патрубку *2* в корпус *1,* проходит через фильтроэлемент *4* и выходит в выходной патрубок *3.* Направление движения жидкости показано стрелками. При фильтровании на сетке *29* фильтроэлемента *4* задерживаются загрязнения, а также происходит сорбирование и удерживание длинноцепочных молекул высокомолекулярных соединений и их конгломератов. При этом снижается пропускная способность фильтроэлемента *4* за счет "зарастания" поверхности сетки *29.* При прохождении жидкости через лопатки турбинки *5* развивается крутящий момент, который передается на вал *6.* При вращении вала *6* толкатель *12* с роликом *13* обкатывает волнообразные выступы *10* кольца *9.* Это вызывает колебания фильтроэлемента *4,* закрепленного в упругой подвеске в виде сильфона *11.* Изменяя форму выступов *10* и их количество, можно регулировать и подбирать оптимальные для каждой среды величины виброускорения, амплитуды и частоты вибрации фильтроэлемента *4.* Вибрация способствует срыву частиц загрязнений с поверхности сетки. Проходя через зазор *22* и резко изменяя направление движения, жидкость дополнительно очищается от загрязнений крупного размера за счет инерционной сепарации. Загрязнения скапливаются в карманах *20.* Направляющие аппараты *23* и *24* формируют поток и повышают КПД турбинки 5. Однако и при воздействии вибрации происходит, хотя и в значительно меньшей степени, "зарастание" сетки. При этом возрастает перепад давления на фильтроэлемент *4.* За счет этого перепада сильфон *11* растягивается и зазор между фланцем *16* и корпусом *1* уменьшается. При достижении предельно допустимого перепада фланец *16* контактирует с индикатором *25* электрического или другого типа, который сигнализирует о необходимости очистки фильтра или замене фильтроэлемента *4.*

Селективные фильтры с продольно-поперечной вибрацией фильтроэлемента. На рис. 6, *а* изображена конструктивная схема селективного фильтра с продольно-поперечной вибрацией фильтроэлемента [9]. Способ фильтрования, реализуемый в этом фильтре, заключается в том, что фильтруемую среду пропускают через вращающуюся фильтровальную перегородку, осуществляя при этом гидродинамический смыв осадка за счет перепуска части фильтруемой среды вдоль фильтровальной перегородки. Перепускаемую часть фильтруемой среды после использования для гидродинамического смыва направляют в диспергатор, где осуществляют разрушение частиц загрязнений до величины меньше требуемой тонкости фильтрования, а затем впрыскивают под давлением в виде струй, направленных на вращающуюся фильтровальную перегородку. При этом фильтровальную перегородку могут подвергать воздействию продольно-поперечной вибрации.

Фильтр содержит корпус *1* с входным *2,* выходным *3* и перепускным *4* патрубками, установленную в нем с зазором 5 относительно стенок корпуса 7 вращающуюся фильтровальную перегородку *6,* соединенную с приводом (не показан) вращения. Фильтр снабжен насосом 7 со ступицей *8* и рабочим колесом *9,* диспергатором *10* и каналом 77 перепуска жидкости, соединяющим дисперга-

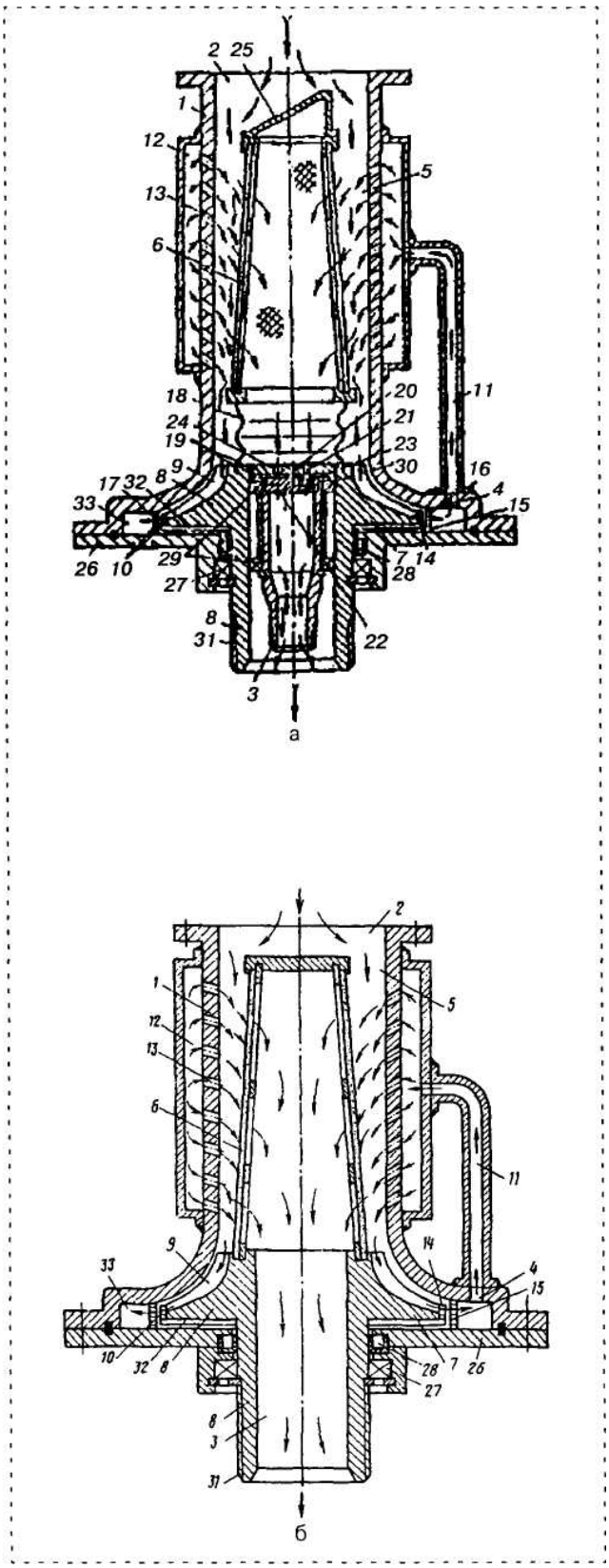

Рис.6

тор *10* с зазором *5* между фильтровальной перегородкой *6* и корпусом *1,* при этом фильтровальная перегородка *6* закреплена на ступице *8* перед насосом 7, причем корпус *1* снабжен кольцевым коллектором *12 и в* нем выполнены каналы *13* в виде сверлений, направленных под углом к поверхности фильтровальной перегородки *6* и соединенных через коллектор *12* каналом *11* перепуска. Диспергатор *10* выполнен в виде не менее чем двух концентрических колец *14* и 75 с прорезями *16* (или отверстиями), установленных с зазором *17* относительно друг друга, причем одно кольцо *14* закреплено на периферии рабочего колеса *9,* а другое 75— неподвижно на корпусе *1.*

Фильтр может быть снабжен сильфоном *18,* посредством которого фильтровальная перегородка *6* закреплена на ступице *8* насоса 7, и пульсатором *19,* выполненным в виде диска *20 с* наличием в нем по окружности отверстий *21* и закрепленного внутри ступицы *8* насоса 7. При этом выходной патрубок *3* фильтра снабжен перегородкой *22* с каналом *23,* расположенным на диаметре расположения отверстий *21* диска *20,* и установленной с зазором *24* относительно диска *20.* Фильтровальная перегородка *6* снабжена основанием *25,* выполненным наклонно к оси фильтровальной перегородки *6.* Корпус 7 закрыт фланцем *26,* на котором в подшипниках *27* установлен насос. Ступица *8* уплотнена посредством манжеты *28.* При установке внутри ступицы *8* пульсатора *19* выходной патрубок *3,* выполненный неподвижным, установлен в ступице *8* на подшипниках *29.* Канал *23* уплотнен относительно диска *20* уплотнениями *30* торцового типа. На ступице £ выполнены шлицы *31* для соединения с приводом (не показан). Насос 7 снабжен импеллерными лопатками *32* гидродинамического уплотнения и имеет спиральный или кольцевой отвод.

Жидкость (суспензия) поступает в патрубок *2* и фильтруется через фильтровальную перегородку *6.* Последняя вместе с насосом 7 приводится во вращение через шлицы *31* приводом (не показан). При вращении фильтровальной перегородки *6* за счет действия центробежной силы частиц загрязнения отбрасываются к периферии и, захватываясь потоком перепускаемой жидкости, поступают в насос 7. В рабочем колесе *9* насоса 7давление перепускаемой жидкости повышается, и она поступает в диспергатор *10,* где осуществляются разрушение и размол частиц суспензии, которые превышают размер ячеек фильтровальной перегородки *6.* Размер прорезей (отверстий) *16* обеспечивает размол до размеров менее размера ячеек фильтровальной перегородки *6.* Из отвода *33* суспензия перепускается по каналу 77 в коллектор *12,* откуда

она впрыскивается под высоким давлением и с высокими скоростями через каналы *13* в зазор *5*.

В результате осуществляется интенсивный гидродинамический смыв слоя загрязнений и осадка с поверхности фильтровальной перегородки. Это значительно улучшает очистку фильтровальной перегородки *6* и повышает ресурс работы фильтра, что особенно важно при фильтровании суспензии в неньютоновской среде, так как такая среда склонна к образованию больших конгломератов и к быстрому забиванию пористых перегородок. За счет того, что в диспергаторе *10* происходит разрушение больших конгломератов частиц при прохождении вращающихся относительно друг друга колец *14* и *15* с прорезями *16,* частицы проходят через фильтровальную перегородку *6* и тем самым полезно используются.

Таким образом, фильтр выполняет роль "селективного" фильтра, пропускающего частицы суспензии, не превышающие определенного размера. Такие фильтры необходимы в химической технологии и двигателестроении для фильтрования суспензионных топлив. При установке внутри ступицы *8* пульсатора *19* создаются пульсации давления за счет изменения гидравлического сопротивления выходного патрубка *3* фильтра при периодическом совпадении отверстий *21* с каналом *23*. Пульсирующий перепад давления воздействует на основание *25,* в результате чего создается сила, периодически сжимающая упругий сильфон *18*. За счет выполнения основания *25* наклонным сила разлагается на две составляющие — параллельную и перпендикулярную оси фильтроперегородки *6*. В результате создаются продольно-поперечные вибрации.

На рис. 6, *б* изображена конструктивная схема аналогичного фильтра, но в упрощенном варианте [9]. В нем фильтровальная перегородка не вибрирует, но могут создаваться пульсации расхода с использованием внешнего пульсатора (на рис. не изображен). Название и функциональное назначение элементов, изображенных на рис. 6, *б,* аналогично показанным на рис. 6, *а*.

Фильтры с периодическим изменением направления поперечной вибрации фильтроэлемента. На рис. 7 изображена конструктивная схема фильтра, в котором использованы те же конструктивные инженерные решения для организации гидродинамического вибрационного фильтрования, но направление поперечной вибрации периодически меняется [10]. Фильтр содержит корпус *1* с входным и выходным патрубками *2, 3* и установленный в нем фильтровальный элемент *4* с фильтровальной перегородкой *5*, имеющей поверхность тела вращения. Фильтр снабжен пульсатором расхода

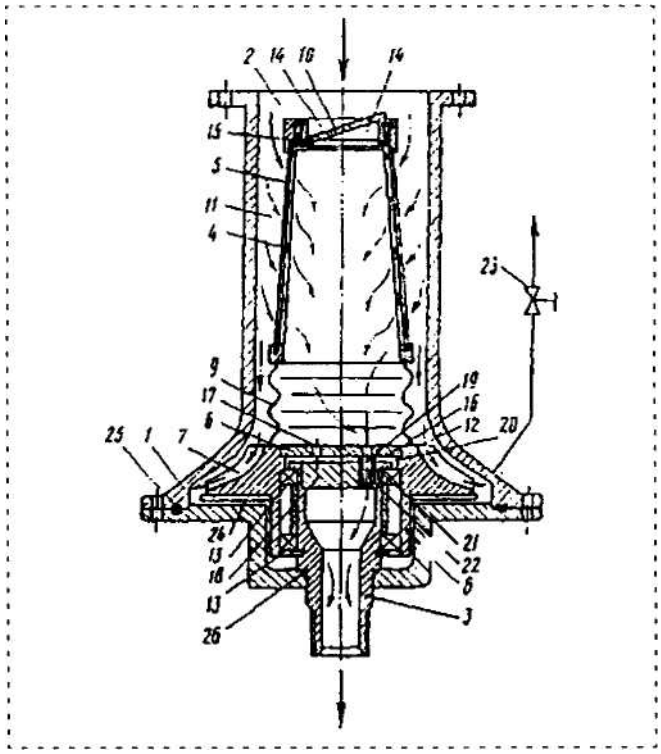

Рис. 7

6, приводной турбинкой 7 со ступицей *8* и сильфоном *9,* посредством которого фильтровальный элемент *4* закреплен перед турбинкой 7 на ступице *8*. При этом крышка *10* фильтровального элемента *4* расположена навстречу потоку среды, выполнен на наклонной к оси элемента и установлена с возможностью поворота относительно фильтровальной перегородки *5*. Последняя расположена с зазором *11* относительно поверхности корпуса *1,* а указанный зазор *11* сообщен с входом 72 турбинки *7*. Зазор 77 между фильтровальной перегородкой 5 и поверхностью корпуса 7 выполнен сужающимся в сторону входа *12* турбинки 7. Перегородка 5 выполнена конической с диаметром, увеличивающимся в сторону турбинки 7. Ступица *8* турбинки 7 установлена в корпусе 7 на опорах вращения *13*. Наклонная крышка *10* фильтроэлемента *4* снабжена не менее чем одним ребром *14* радиального на правления и закреплена на фильтроэлементе *4* по средством эластичного кольца 75 из антифрикционного материала, например фторопласта. Пульсатор *6* выполнен в виде диска 76 с выполненными в нем по окружности отверстиями 77и закрепленного внутри ступицы *8* турбинки 7.

Выходной патрубок *3* фильтра снабжен диском *18* с каналом *19,* расположенным на диаметре расположения отверстий 7 7 диска *16,* причем перегородка *18* выполнена перекрывающей сечение патрубка *3* и установлена с зазором *20* относительно

диска *16.* Пульсатор *6* снабжен уплотнением торцового типа, выполненным в виде подпружиненного кольца *21* из антифрикционного материала, например фторопласта, установленного в канале *19* перегородки *18* и контактирующего с диском *16.* Кольцо *21* подпружинено посредством пружины *22.* На выходе турбинки *7* стоит регулирующий вентиль *23,* посредством которого регулируется расход перепускаемой жидкости, частота вращения фильтровального элемента *4* и частота пульсаций давления. На задней стороне турбинки *7* выполнены лопатки *24* гидродинамического уплотнения. Корпус снабжен уплотнениями *25, 26.*

Фильтр работает следующим образом. Фильтрующая среда под давлением поступает в корпус *1.* Часть среды перепускается через зазор *11* на вход

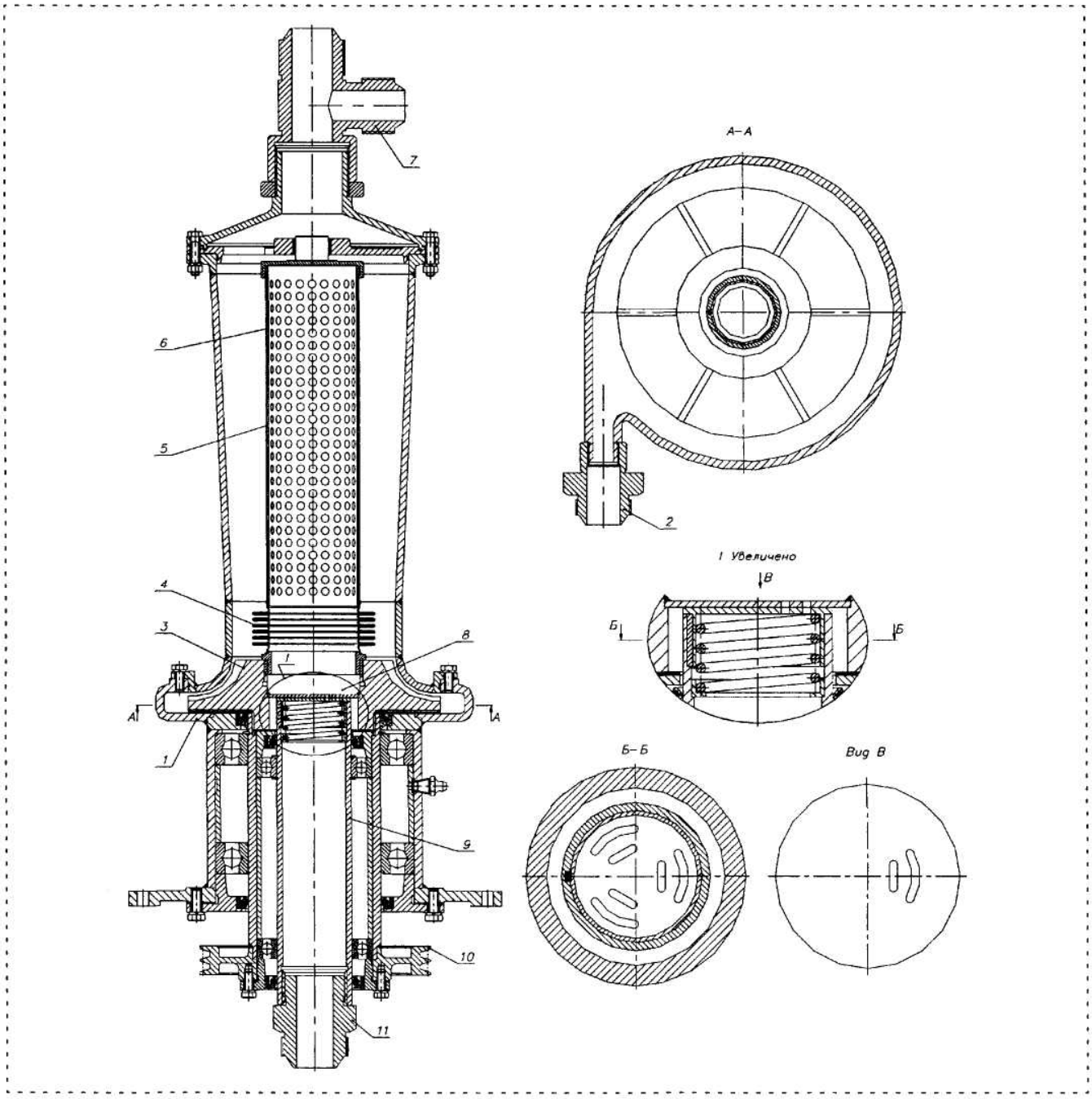

Рис. 8. Гидродинамический вибрационный фильтр (сборочный чертеж опытного образца):
1 — сборный корпус; *2* — патрубок для отвода загрязнений; *3* — лопастное колесо; *4* — сильфон; *5* — фильтровальный элемент; *6* — фильтроткань; *7* — входной патрубок; *8* — гидравлический узел; *9* — труба; *10* — шкив; *11* — выходной патрубок

12 турбинки *7*. Турбинка *7* может быть осевого или центробежного типа. Жидкость из турбинки *7* сбрасывается по магистрали с регулирующим вентилем *23* на слив или снова на вход в фильтр. За счет перепуска части жидкости через зазор *11* с повышенными скоростями осуществляется гидродинамический смыв осадка с поверхности фильтровальной перегородки *5*. Турбинка *7* приводится во вращение, а вместе с ней начинает вращаться фильтровальный элемент *4* и диск *16* пульсатора *6*. При вращении фильтровального элемента *4* за счет действия центробежных сил частицы осадка сбрасываются с поверхности фильтровальной перегородки, слой осадка становится более пористым, что улучшает его смыв расходом жидкости, перепускаемой через зазор *11* на турбинку *7*. Кроме того, при вращении диска *16* относительно неподвижного диска *18* происходит периодическое сообщение и разобщение отверстий *17* с каналом *19,* уплотненным относительно диска *16*.

В результате периодически изменяется гидравлическое сопротивление фильтра, что приводит к пульсациям перепада давления. Пульсации давления вызывают периодически меняющуюся силу, действующую на крышку *10,* что приводит к периодическим сжатиям упругого сильфона *9*. Так как крышка *10* выполнена наклонной, сила, действующая на нее, направлена под углом к оси фильтроэлемента *4*. Эта сила разлагается на две составляющие — параллельную и перпендикулярную поверхности фильтровальной перегородки 5. Это вызывает вибрацию фильтроэлемента *4* в двух плоскостях — параллельной и перпендикулярной направлению фильтрации, что повышает производительность фильтра и его очистку. За счет периодического перекрытия канала *19* диском *16* периодически изменяется расход перепускаемой через турбинку 7 среды, при перекрытии канала *19* перепускаемый расход увеличивается, а при сообщении отверстия *17* с каналом *19* — уменьшается. Это вызывает неравномерность вращения турбинки *7*.

Периодические ускорения и замедления вращательного движения фильтроэлемента *4* улучшают за счет действия инерционных сил расслоение осадка загрязнений на фильтровальной перегородке *5,* что повышает эффективность его гидродинамического смыва. Кроме того, за счет выполнения крышки *10* с возможностью поворота относительно фильтровальной перегородки *5* она постоянно поворачивается в фильтроэлемент, этому способствует ребро *14,* которое осуществляет гидродинамическое торможение вращения крышки *10* относительно вращающейся фильтровальной перегородки. В результате направление составляющей силы, действующей на крышку *10* и перпендикулярной оси фильтровального элемента *4,* меняется, т. е. направление поперечной вибрации меняется относительно фильтровальной перегородки 5, что улучшает вибрационную очистку фильтровальной перегородки. Совместное сочетание перечисленных выше факторов существенно повышает пропускную способность фильтра и его ресурс за счет улучшения очистки фильтровальной перегородки *5* от загрязнений в процессе работы фильтра.

Для экспериментальной отработки конструктивных элементов фильтра на основе описанных выше конструктивных решений авторами разработана конструкция опытного фильтра, сборочный чертеж которого показан на рис. 8. На рис. 9 (см. 4-ю стр. обложки) представлен общий вид этого гидродинамического вибрационного фильтра в разрезе, который дает более ясное представление об особенностях конструкции.

Теоретическое описание работы фильтра будет представлено вниманию читателя в следующих публикациях, в которых также будут приведены результаты экспериментальных исследований и инженерная методика расчета его параметров.

Список литературы

1. **Финкельштейн З. Л**. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. — М.: Недра, 1986. — 255 с.
2. **Финкельштейн З. Л.** Центробежная очистка рабочих масел. — М.: Машиностроение, 1993. — 192 с.
3. Хафизов А. Р., Сайфуллин Н. Р., Ишмаков Р. М., Абызгильдин А. Ю. Утилизация отработанных масел. — Уфа: Реактив, 1996. — 260 с.
4. **Белов С. В., Девисилов В. А., Жданов В. Н., Петренчук А. К., Беляев А. С.** Способ очистки суспензий и фильтр для его осуществления. А. с. № 1526760, 1989.
5. **Белов С. В., Девисилов В. А., Жданов В. Н., Беляев А. С.** Фильтр для суспензий. А. с. № 1465076, 1989.
6. **Белов С. В., Девисилов В. А., Жданов В. Н., Петренчук А. К., Симуков Е. А.** Фильтр для суспензий. А. с. № 1502058, 1989.
7. **Белов С. В., Девисилов В. А., Жданов В. Н., Петренчук А. К., Беляев А. С.** Фильтр. А. с № 1530212, 1989.
8. **Белов С. В., Девисилов В. А., Жданов В. Н., Кауханов С. Б.** Фильтр для высоковязких структурированных жидкостей. А. с. № 1457966, 1989.
9. **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.
10. **Белов С. В., Девисилов В. А., Жданов В. Н., Петренчук А. К.** Способ фильтрования и вибрационный фильтр для его осуществления. А. с. № 1567246, 1990.

Рисунок к статье В. А. Девисилова, И. А. Мягкова

«ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ ВИБРАЦИОННОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ И КОНСТРУКЦИИ ФИЛЬТРОВ

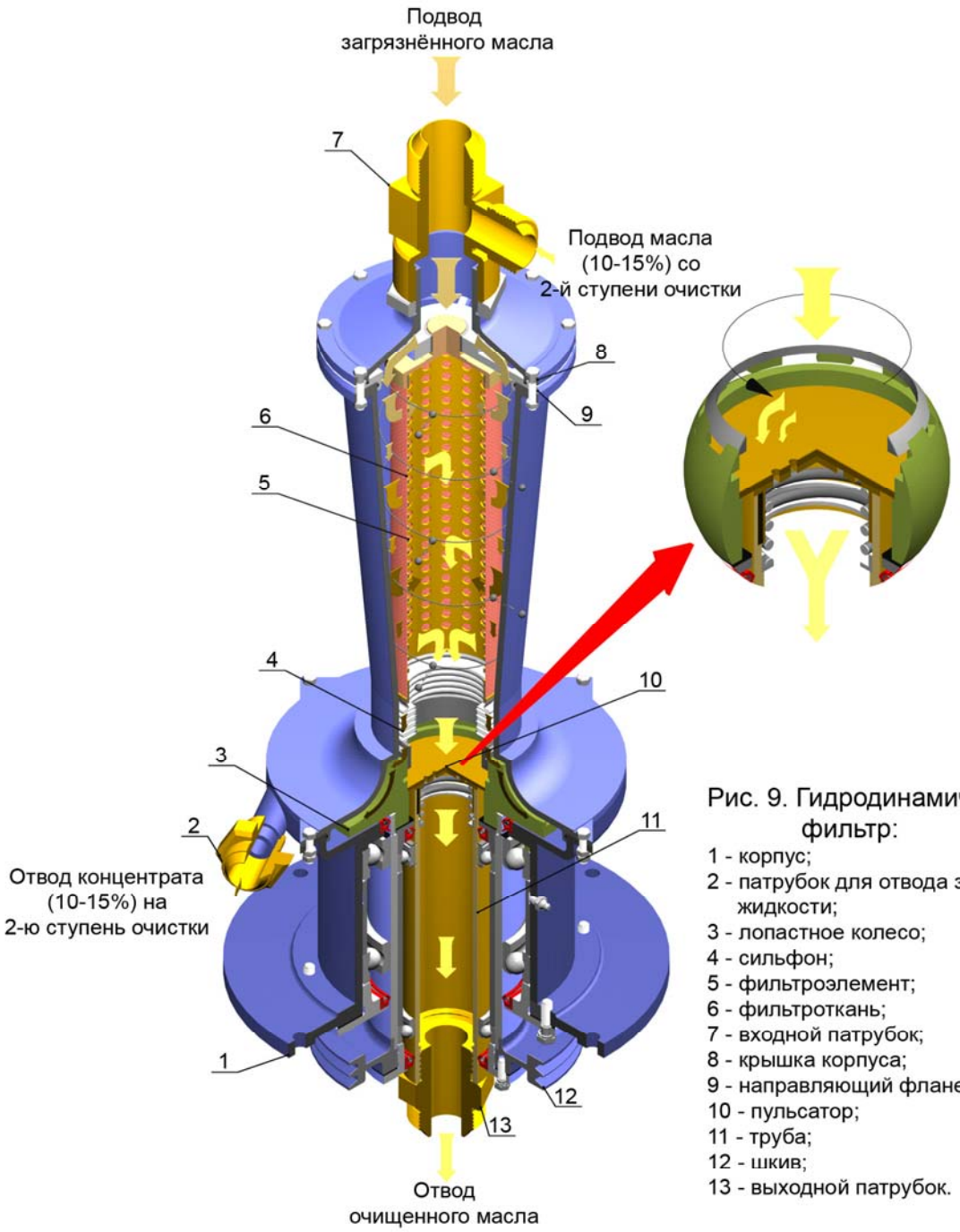

Рис. 9. Гидродинамический вибрационный фильтр:

1 - корпус;
2 - патрубок для отвода загрязнённой жидкости;
3 - лопастное колесо;
4 - сильфон;
5 - фильтроэлемент;
6 - фильтроткань;
7 - входной патрубок;
8 - крышка корпуса;
9 - направляющий фланец;
10 - пульсатор;
11 - труба;
12 - шкив;
13 - выходной патрубок.