

Е.А. Николаев, Е.В. Боев,
В.Г. Афанасенко
ФГБОУ ВПО Уфимский
государственный нефтяной
технический университет

E.A. Nikolaev, E.V. Bоеv,
V.G. Afanassenko
FSBEI Ufa state
petroleum technical university

Рассмотрены конструктивные особенности рабочих органов роторно-дискового смесителя и оформления аппарата в целом. По интенсивности возникновения гидродинамических явлений рабочие органы смесителя поделены на две группы. Первая, в которой происходит генерация пульсаций скорости и давления обрабатываемой среды и вторая, где такие колебания отсутствуют. Оформление аппарата в целом зависит от способа крепления вала, который может быть однопролётным и консольным. Особенность однопролётных – расположение вращающихся рабочих элементов между двумя опорами, консольных – на свободном конце вала.

Considered design features rotor and disk mixers. On intensity of occurrence of the hydrodynamic phenomena working bodies of the amalgamator are divided on two groups. The first, in which occurs generation of pulsations of speed and pressure of the processed environment and the second where such fluctuations are absent. Device registration as a whole depends on a way of fastening of a shaft which can be one-flying and console. Feature one-flying - an arrangement of rotating workers of elements between two support, console - on the free end of a shaft.

Ключевые слова: смеситель, диск, ротор, статор, вал, перфорация, гидродинамическое явление.

Key words: mixer, disk, rotor, stator, shaft, punching, hydrodynamic phenomenon.

ВВЕДЕНИЕ

Одними из основных процессов, используемых в производстве, являются процессы смешивания. Интенсифицировать процессы смешения можно с помощью организации вихревого движения потоков газа или жидкости. Вихревое движение оказывает на обрабатываемую систему комплексное действие различных сил и явлений, к которым можно отнести центробежные и инерционные силы, локальную кавитацию, гидравлические удары, интенсивные турбулентные пульсации, различные вихревые эффекты и т.д. Поэтому вихревое движение приводит к интенсификации процесса смешения неоднородной системы и сопутствующее ей ускорение обменных процессов за счет увеличения удельной поверхности контакта фаз и гидродинамической неустойчивости межфазной поверхности.

Смесители вихревого типа можно разделить на две группы: аппараты без вращающихся элементов – статические смесители и аппараты с вращающимися элементами – динамические смесители.

В статических смесителях турбулизация потока производится за счет установки в корпусе аппарата неподвижных элементов, которые позволяют менять направление движения потока, приводящие к появлению локальных зон интенсивного завихрения. К динамическим смесителям относят устройства, которые в качестве рабочего органа содержат ротор, при вращении которого и создаётся вихревое движение потока, поэтому их часто называют – роторные смесители. Существует множество особенностей

конструктивного исполнения роторных смесителей, так устройства могут содержать только вращающиеся элементы, а могут вращающиеся элементы чередоваться с неподвижными (статорами). Наличие и подвижных и неподвижных элементов, как правило, интенсифицирует процессы смешения. На вращающихся элементах может быть выполнена перфорация, как простой, так и сложной геометрической формы, кроме этого на интенсивность гидродинамического воздействия на обрабатываемую среду существенно влияет положение, форма и размер перфораций.

Представленные группы аппаратов отличаются видом энергии, затрачиваемой на процесс смешения. В статических смесителях смешение происходит за счет снижения гидростатической составляющей напора, в динамических смесителях необходимая для процесса механическая энергия передается обрабатываемой среде через ротор, вращаемый электродвигателем.

Статические смесители отличаются простотой конструкций, неприхотливостью в эксплуатации, низкими затратами на изготовление и эксплуатацию, но данная группа аппаратов не может конкурировать с динамическими по интенсивности воздействия на обрабатываемый поток [1].

Таким образом, решая проблему повышения эффективности процесса обработки сточных вод, целесообразно, разрабатывать смесители динамического типа и оптимизировать их для заданных процессов.

Из перспективных разновидностей динамических перемешивающих устройств можно выделить роторно-дисковые смесители (РДС) [2-5].

Рассмотрим конструкции рабочих элементов статора и ротора РДС и конструктивное оформление подобных аппаратов в целом.

СТАТОР И РОТОР

Конструкция ротора представляет собой плоский диск с перфорациями, который крепится на валу. Статор имеет аналогичную конструкцию, отличаясь лишь тем, что крепится в корпусе. На рисунке 1 представлен вариант статорного а) и роторного б) диска.

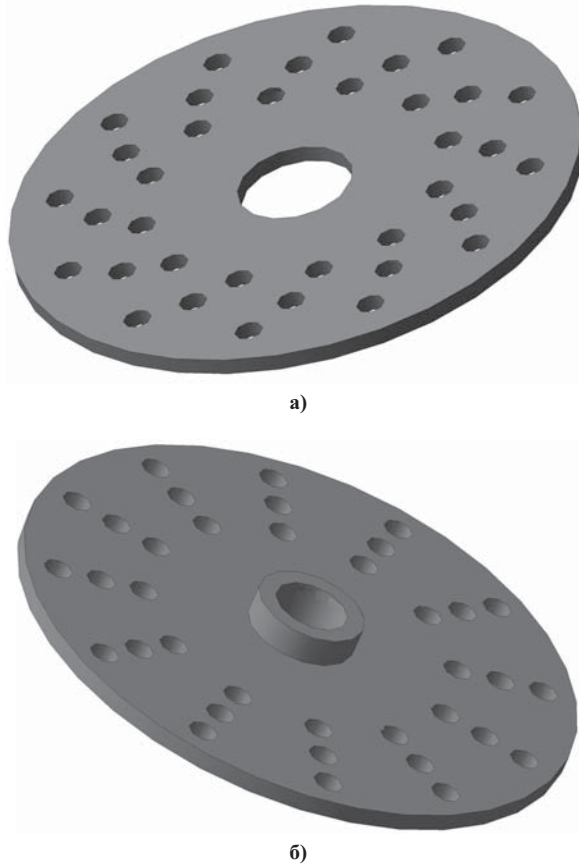


Рисунок 1. Вариант статорного а) и роторного б) диска

При такой конструкции рабочих органов РДС определяющий характер воздействия на обрабатываемые среды имеет только геометрия отверстий и их расположение в пространстве диска, а также размер зазора между дисками.

При прохождении обрабатываемой среды через статоры и роторы возникают следующие гидродинамические явления: турбулентные пульсации, срезающие усилия и т.д. В ряде случаев необходимо максимально усилить или наоборот свести к минимуму воздействие какого-либо гидродинамического явления, например, изменить амплитуду пульсаций скорости потока обрабатываемой смеси, можно изменяя размеры, расположение и геометрическую форму перфораций на дисках ротора и статора.

РДС можно условно разделить на две группы – первая, в которой происходит генерация пульсаций скорости и давления обрабатываемой среды и вторая, где такие колебания отсутствуют. Рабочие органы (ротор и статор) первой группы аппаратов

выполнены так, что при вращении вала ротора возникают моменты полного перекрытия каналов движения обрабатываемой среды через аппарат, второй группы – наоборот, площадь проходного сечения аппарата остаётся постоянной, что обеспечивает равномерное прохождение обрабатываемой смеси через перфорированные диски.

Варианты конструктивного исполнения ротора и статора первой группы представлены на рисунке 2.

На рисунке 2а представлен один из вариантов конструкций дисков ротора и статора [6], реализующих импульсный режим обработки смеси за счет того, что каждое отверстие дисков ротора и статора выполнено в виде сегмента диска, усечённого двумя concentрическими окружностями, причём площадь отверстий на дисках ротора и статора и их расположение определяются системой уравнений (1).

$$\begin{cases} S_n = \frac{\varphi}{2}(R_{n+1}^2 - R_n^2) \\ S_n + S_{n+2} = S_{n+1} + S_{n+3}, \\ \frac{2\pi}{\varphi} = z \\ R_{n+1} > R_n \end{cases} \quad (1)$$

где $S_n, S_{n+1}, S_{n+2} \dots$ – площади отверстий дисков ротора и статора, м²;

φ – образующий угол усеченных сегментов отверстий дисков ротора и статора, рад;

$R_n, R_{n+1}, R_{n+2} \dots$ – образующие радиусы concentрических окружностей усеченных сегментов отверстий дисков ротора и статора, м;

n – положительное целое число (1, 2, 3 ...);

z – положительное четное число (2, 4, 6 ...).

В варианте на рисунке 2б та же задача решается за счёт того, что отверстия на дисках ротора и статора расположены по concentрическим окружностям, причём размеры отверстий и их расположение подчиняются системе уравнений (2) [7].

$$\begin{cases} R_{0n} = R_n \sqrt{2(1 - \cos \frac{\varphi}{4})} \\ R_n + R_{0n} < R_{n+1} - R_{0n+1}, \\ \frac{360^\circ}{\varphi} = z \end{cases} \quad (2)$$

где $R_1, R_2 \dots R_n$ – радиусы concentрических окружностей, на которых расположены центры отверстий дисков, м;

$R_{01}, R_{02}, \dots R_{0n}$ – радиусы отверстий дисков, м;

φ – образующий угол сегмента диска с отверстиями, град;

n, z – положительные целые числа.

Такие конструкции перфорированных дисков ротора и статора будут способствовать генерированию пульсаций давления в потоке обрабатываемой смеси. Амплитуду этих пульсаций можно оценить по формуле:

$$\Delta P = \rho \frac{G^2}{2S^2} \cos(2\pi vt + \theta_0), \quad (3)$$

где ρ – плотность обрабатываемой смеси, кг/м³;
 G – объёмный расход обрабатываемой смеси в аппарате, м³/с;

S – суммарная площадь отверстий на диске ротора или статора, м²;

$v = n \cdot z$, n – число оборотов ротора, об/с и z – число сегментов совпадающих отверстий на роторе или статоре (формула (1, 2));

θ_0 – начальная фаза пульсаций давления.

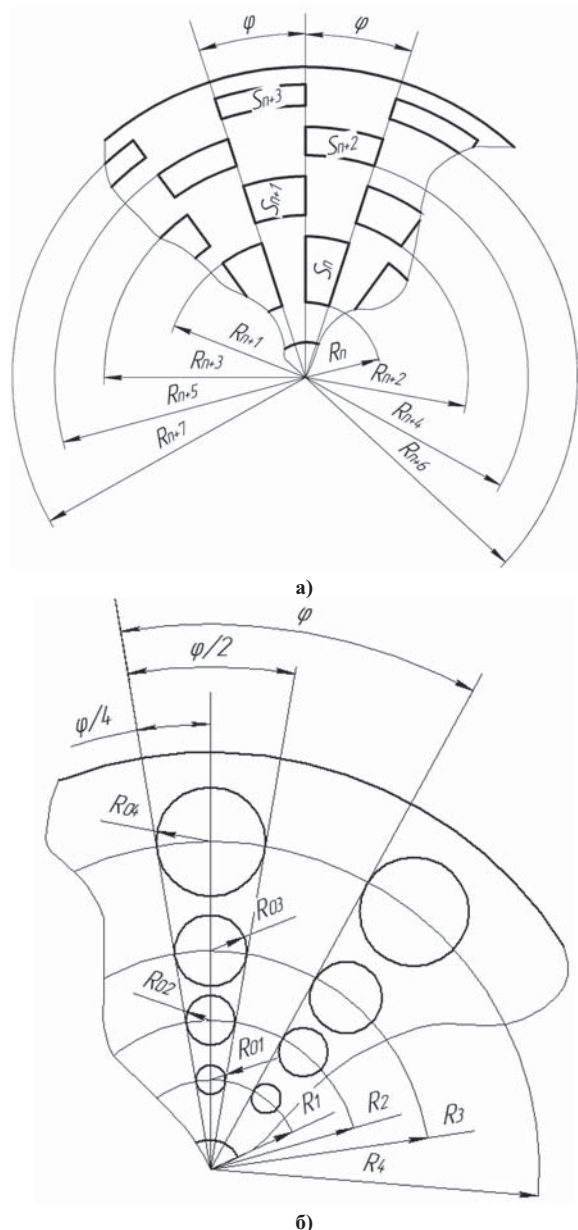


Рисунок 2. Варианты исполнения ротора и статора первой группы

Особенность рабочих органов второй группы заключается в том, что для снижения эффекта пульсации потока во время обработки смесей необходимо, чтобы в каждый момент времени работы РДС площадь совпадающих отверстий ротора и статора была одинакова.

В изображённом на рисунке 3а варианте исполнения дисков аппарата [8], эта задача решается за счет того, что диски ротора и статора имеют по два ряда (количество рядов может быть больше) концентрически расположенных отверстий, каждое из которых выполнено в виде сегмента диска, усечённого двумя концентрическими окружностями, причём на роторе (статоре) первый ряд отверстий смещён относительно второго на угол φ , а площадь отверстий на дисках ротора и статора и их расположение подчиняются системе уравнений (4). Тот же принцип, математическое описание расположения и формы отверстий положен в конструктивном оформлении ещё одного варианта рабочих органов второй группы [9], изображённых на рисунке 3б и представленных системой уравнения (5) для ротора и (6) для статора.

$$\begin{cases} S_1 = \frac{\varphi}{2} (R_2^2 - R_1^2) \\ S_2 = \frac{\varphi}{2} (R_4^2 - R_3^2) \\ S_1 = S_2 \\ \frac{2\pi}{\varphi} = z \end{cases}, \quad (4)$$

где $S_1, S_2, \varphi, R_1, R_2, R_3, R_4, z$ – обозначены по аналогии с формулой (1).

$$\begin{cases} S_1 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} (r_2^2 - r_1^2) \\ S_2 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} (r_3^2 - r_2^2) \\ S_3 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} (r_4^2 - r_3^2) \\ S_4 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{2} (r_5^2 - r_4^2) \\ S_1 + S_3 = S_2 + S_4 \\ \frac{2\pi}{\varphi_2} = n \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} S = \frac{\varphi_2}{2} (r_5^2 - r_1^2) \\ k = \frac{n}{2} \end{cases}, \quad (6)$$

где $S_1, S_2, S_3, S_4, \varphi_1, \varphi_2, r_1, r_2, r_3, r_4, r_5, S, n$ – обозначены по аналогии с формулой (1), k – количество отверстий на статоре.

Выше представлены лишь некоторые варианты возможного конструктивного исполнения рабочих органов РДС, на практике они представлены доста-

точно широко в качестве моделей, описанных в российских и зарубежных патентах. Так, например, известны конструкции с двумя параллельно вращающимися валами с перфорированными дисками [10], с отверстиями на дисках ротора и статора, расположенными по противоположно направленным спиральям или спиральям Архимеда [11].

Необходимость того или иного исполнения рабочих органов РДС зависит от ряда факторов – вязкость среды и её дисперсный состав, возникновение вибраций и гидроударов, удельные энергозатраты, конечный результат обработки и др. Аппараты с рабочими органами первой группы преимущественно используются для обработки маловязких жидких сред. С целью снижения вибрации ротора и износа подвижных частей устройства, при обработке высоковязких жидких сред, легкосмешиваемых компонентов, чаще применяются аппараты с рабочими органами второй группы.

Таким образом, изменяя геометрию рабочих органов РДС, можно управлять гидродинамиче-

скими явлениями, возникающими во время обработки жидких сред в аппаратах подобного типа.

ОФОРМЛЕНИЕ АППАРАТА В ЦЕЛОМ

По способу крепления валы делятся на однопролётные и консольные. Особенность однопролётных – расположение вращающихся рабочих элементов (дисков ротора) между двумя опорами, консольных – на свободном конце вала.

РДС с однопролётным валом

Конструкция РДС с однопролётным валом состоит из загрузочного и разгрузочного патрубка, неподвижного цилиндрического корпуса, в объёме которого жёстко зафиксированы перфорированные диски, расположенные поочерёдно с аналогичными по конструкции перфорированными дисками, закреплёнными на вращающемся роторе. Причём отверстия перфорированных дисков могут быть выполнены в различном исполнении (круглые, прямоугольные, трапециевидные и т.д.) и ориентиро-

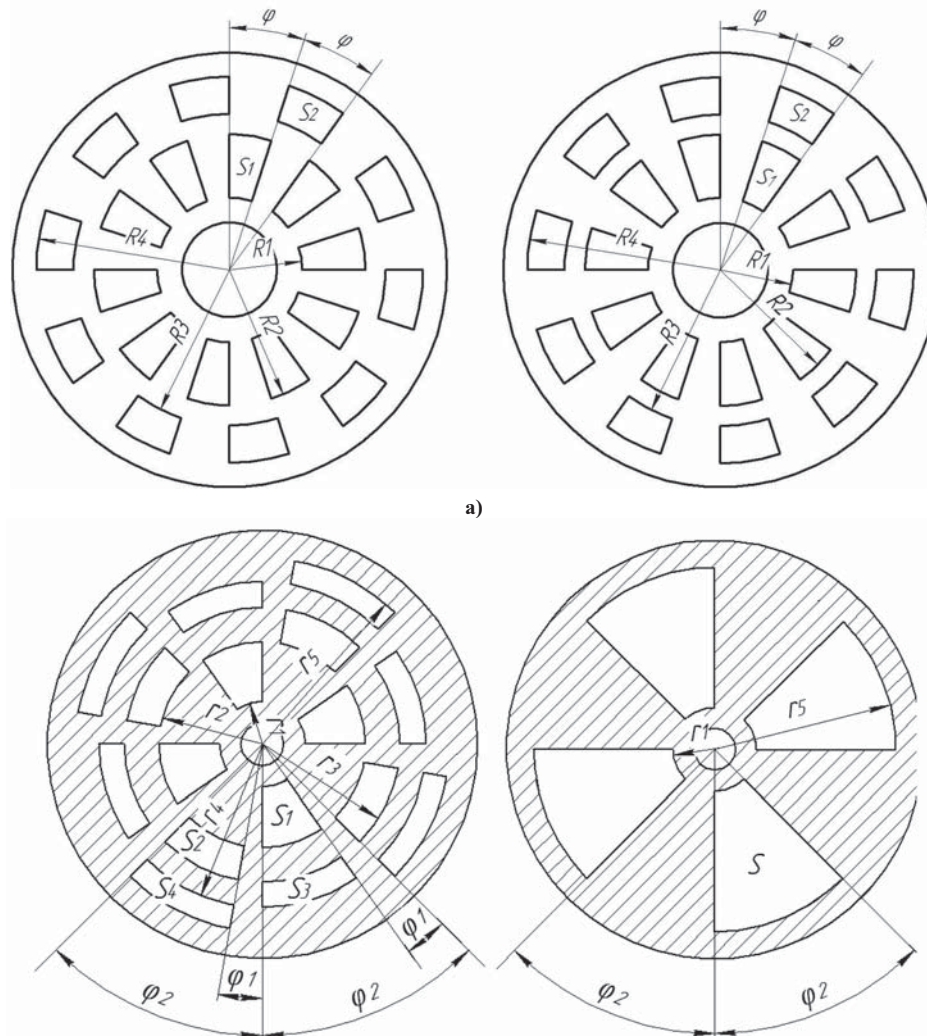


Рисунок 3. Варианты исполнения ротора и статора второй группы

ваться под различным углом в направлении от центра к периферии. На рисунке 4 отверстия ориентированы под углом 45° . Пара, состоящая из одного подвижного и одного неподвижного диска, составляет рабочую ступень аппарата.

РДС может быть выполнен с возможностью регулирования зазора между подвижными и неподвижными перфорированными дисками с помощью регулирующего устройства (рисунк 4) или с помощью дистанцирующих колец.

При работе РДС под действием массовых сил или искусственно создаваемого избыточного давления обрабатываемая смесь перемещается от загрузочного патрубка к разгрузочному патрубку. При движении через перфорированные диски обрабатываемая смесь подвергается интенсивному механическому и гидродинамическому воздействию с проведением процесса диспергирования и перемешивания.

Интенсивность механического воздействия достигается относительно высокой частотой вращения ротора и возникающим в связи с этим высокотурбулентным движением обрабатываемой среды в зазорах между вращающимися и неподвижными перфорированными дисками и за счёт принудительного перекрытия каналов течения обрабатываемой среды с возникновением значительных значений градиента скорости и давления. Отверстия в роторе и статоре, создавая осевой поток, непрерывно ориентируют элементы объёма среды перпендикулярно направлению сдвигового воздействия, а также дробят потоки на малые объемы, способствуя значительно увеличению площади поверхности раздела и равномерному распределению элементов объёма обрабатываемой смеси в аппарате. Кроме того, поскольку материал обрабатывается в малом зазоре,

в нем возникают большие скорости сдвига, что позволяет достичь высокой интенсивности деформационного воздействия.

Направленность отверстий вращающихся перфорированных дисков под некоторым углом (например, под углом 45° как на рисунке 4 от центра к периферии и направленность отверстий жестко зафиксированных перфорированных дисков под таким же углом - в направлении от периферии к центру, выбирается из соображений обеспечения более длительного во времени нахождения смеси в аппарате, а также для выравнивания разницы давления в объёме аппарата, возникающей в результате появления центробежной силы при вращении ротора аппарата.

Возможность изменения величины зазора между вращающимися и неподвижными дисками с помощью перемещения ротора в вертикальном направлении посредством вращения регулировочной гайки или иного устройства, позволит получать на выходе из аппарата дисперсные частицы требуемых размеров.

В зависимости от технологических требований к обработке жидких сред разработаны также и другие варианты конструкции РДС с однопролётным валом.

Вариант РДС с регулирующим устройством и шлицевой муфтой представлен на рисунке 5. В этом случае имеется возможность перемещать вал в осевом направлении с помощью регулирующего устройства по направляющим шлицам муфты, соединяющей вал РДС с валом электродвигателя.

Вариант конструктивного сочетания РДС с РПА (роторно-пульсационным аппаратом) [12] представлен на рисунке 6а и 6б. Здесь по роду воздействия на обрабатываемую среду работу РДС можно условно разделить на две стадии. На первой стадии – прохождении обрабатываемой среды через перфориро-

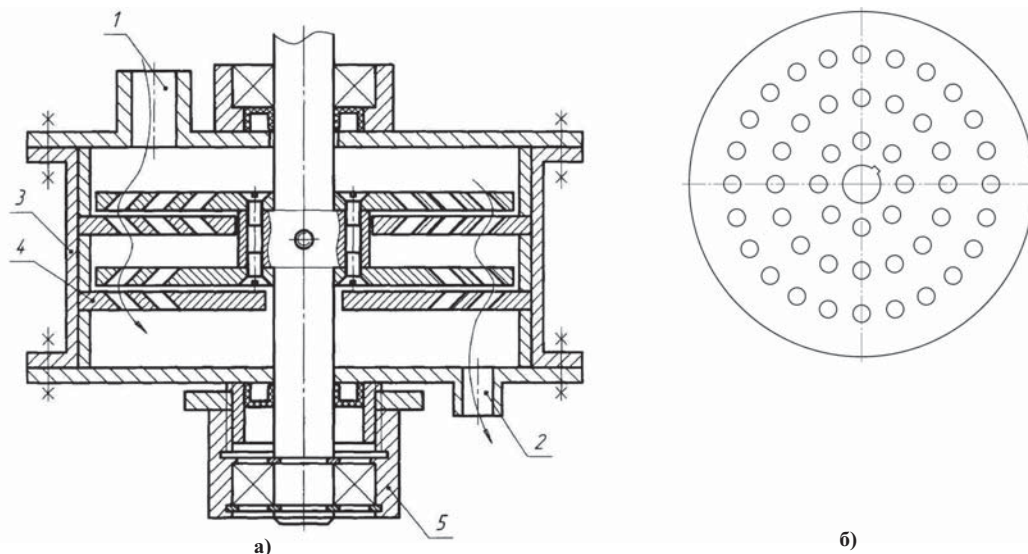


Рисунок 4. Схема двухступенчатого РДС (а) и вариант исполнения его диска (б)
1 – загрузочный патрубок, 2 – разгрузочный патрубок, 3 – неподвижный цилиндрический корпус, 4 – перфорированные диски, 5 – регулирующее устройство

ванные диски – происходит интенсивное механическое воздействие на дисперсные частицы и предварительная гомогенизация обрабатываемой среды. На второй стадии – прохождении обрабатываемой среды через чередующиеся ряды концентрично расположенных относительно оси ротора зубьев – происходит более тонкое диспергирование дисперсных частиц, достигается необходимая эффективность перемешивания и степень дисперсности конечного продукта.

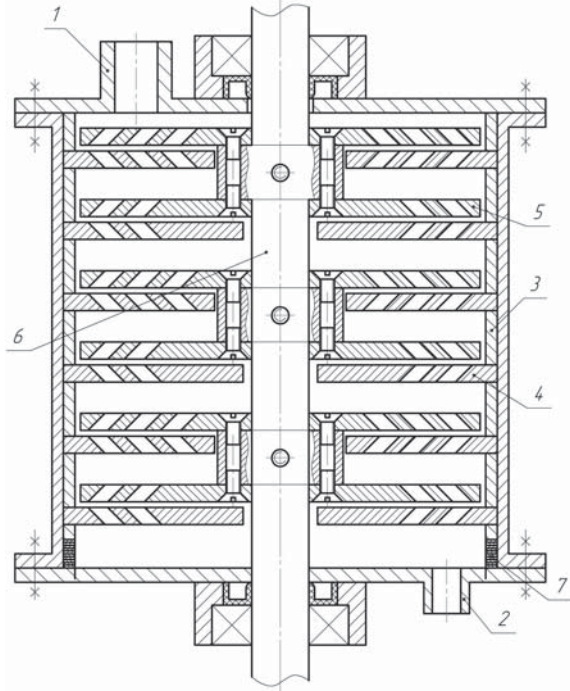


Рисунок 5. Схема РДС с регулирующим устройством и шлицевой муфтой

1, 2 – загрузочный и разгрузочный патрубки, 3 – корпус, 4 и 5 – перфорированные диски, 6 – вал, 7 – дистанцирующие кольца

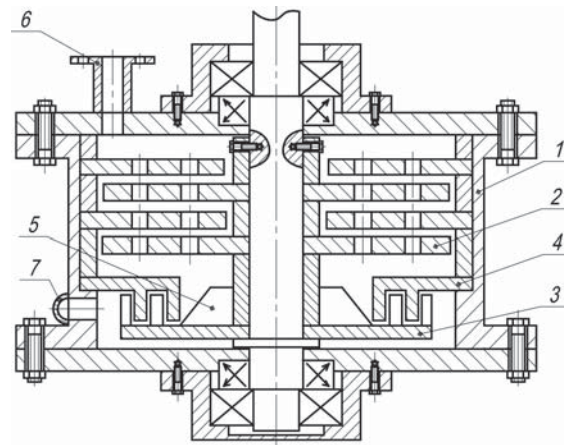
РДС с консольным валом

Вариант исполнения РДС с вращающимися рабочими органами на консоли вала, имеет ряд преимуществ:

- упрощается конструкция РДС, т.к. достаточно иметь только одну съёмную крышку;
- необходимо уплотнять всего одну поверхность вала, т.е. используется либо одно торцевое уплотнение, либо одно сальниковое.

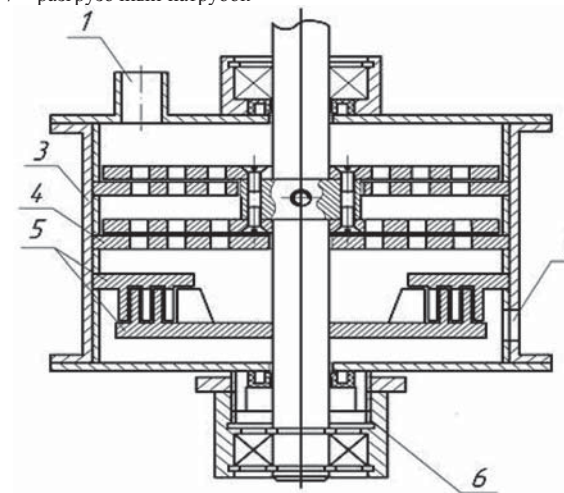
Но в качестве недостатка можно отметить, что снижается жёсткость вала и при работе возможны большие радиальные биения консоли вала.

Варианты исполнения РДС с подвижным диском на консоли и торцевым уплотнением представлены на рисунке 7, с двумя подвижными дисками для обработки в условиях высокого давления (до 1 МПа) на рисунке 8.



а)

1 – корпус, 2 – перфорированные диски РДС, 3 и 4 – диски РПА с зубьями, 5 – транспортные лопасти, 6 – загрузочный патрубок, 7 – разгрузочный патрубок



б)

1 – загрузочный патрубок, 2 – разгрузочный патрубок, 3 – неподвижный цилиндрический корпус, 4 – перфорированные диски, 5 – диски с зубьями, 6 – регулирующее устройство

Рисунок 6. Схемы РДС, совмещённого с РПА

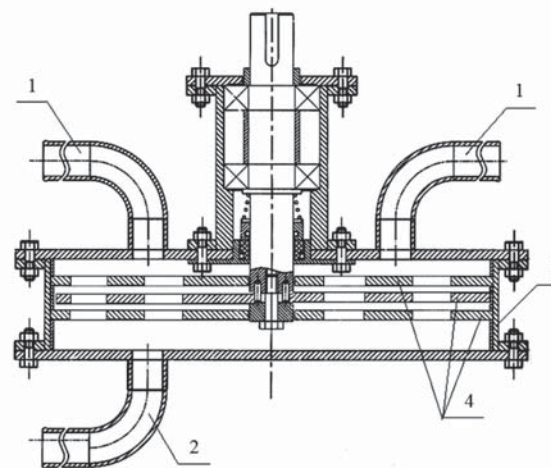


Рисунок 7. Схема РДС с подвижным диском на консоли и торцевым уплотнением

1 – загрузочный патрубок, 2 – разгрузочный патрубок, 3 – неподвижный цилиндрический корпус, 4 – перфорированные диски

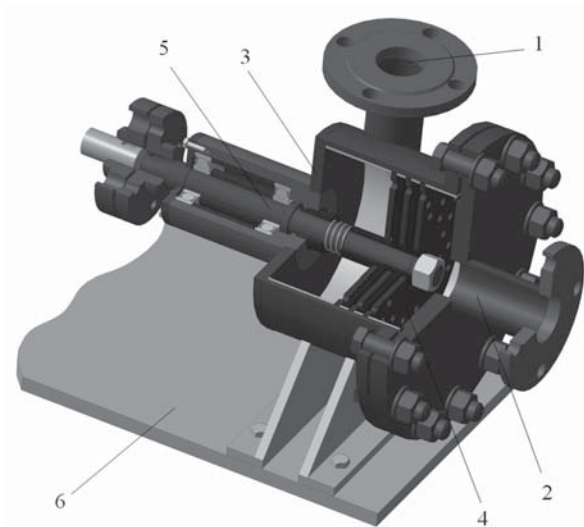


Рисунок 8. Схема РДС с двумя подвижными дисками на консоли для обработки в условиях высокого давления (до 1 МПа)

1 и 2 – загрузочный и разгрузочный патрубок, 3 – неподвижный цилиндрический корпус, 4 – перфорированные диски, 5 – вал, 6 – опора

Как было отмечено ранее, эффективность диспергирования зависит от появления ряда гидродинамических явлений. В первую очередь, интенсивность воздействия этих явлений зависит от скорости вращения вала. Возможен такой случай, когда использование стандартного асинхронного электродвигателя с частотой вращения вала $n=3000$ об/мин, не приведёт к достижению требуемого качества обработки. В этом случае возникает необходимость увеличить число оборотов роторных дисков относительно статорных. В самом простом случае это можно достичь путём передачи крутящего момента от электродвигателя на вал РДС через систему шкивов, но тогда габаритные размеры установки увеличатся, кроме того высокие скорости приведут к перегреву подшипников и к необходимости создания их дополнительного охлаждения. Проблему можно решить путём использования двух электродвигателей. Один вращает консольный вал роторных дисков, второй статорных.

Вариант РДС с двумя роторами на консоли, приводимыми во вращение двумя электродвигателями, представлен на рисунке 9.

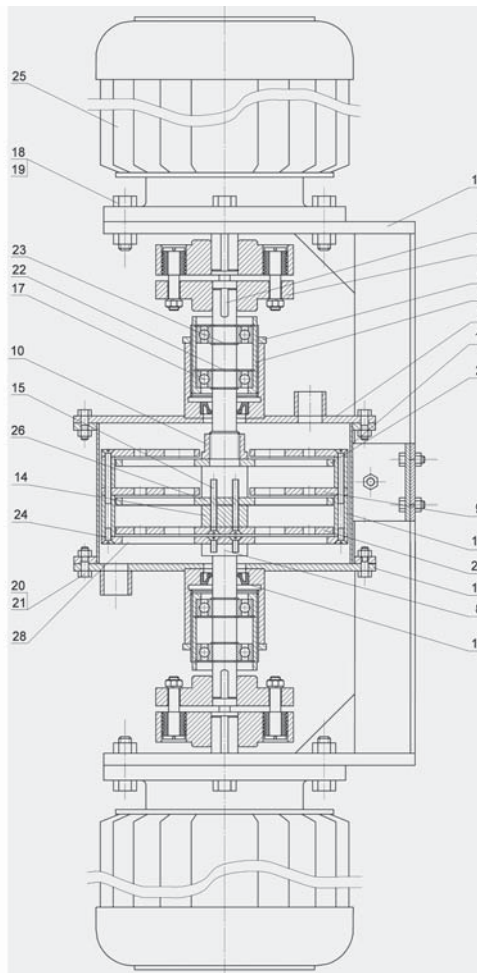


Рисунок 9. Схема двухроторного РДС

1 – корпус;
2, 9, 26, 27, 28 – диск;
3, 12 – крышка,
4, 16 – регулирующее устройство;
5 – гайка регулировочная,
6 – муфта;
7, 8 – вал РДС;
10 – гайка вала;
11 – опора;
13, 14 – втулка;
15, 24 – винт;
17 – подшипник;
18, 20 – болт;
19, 21 – гайка;
22, 23 – стопорное кольцо;
25 – электродвигатель

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные конструкции РДС обладают следующими преимуществами:

- небольшие габариты;
- высокая производительность;
- высокая эффективность гомогенизации;
- малое удельное потребление энергии;
- возможность оперативного регулирования параметров обработки сырья;
- возможность обработки за один проход;

- относительная простота конструкции и низкая стоимость установки.

При выборе конструкции РДС для обработки смесей, в большинстве случаев, целесообразно обращаться к аппаратам с рабочими органами первой группы, т.к. они позволяют интенсифицировать процесс смешения за счёт создания в РДС генераций пульсаций скорости и давления.

Область применения РДС с рабочими органами первой группы в нефтепереработке – процессы компаундирования: производство высококачественных экологически чистых видов топлива с экономией присадок, производство стойких водотопливных эмульсий, приготовление многокомпонентных моторных масел, смазок, спецжидкостей и химических компонентов.

Исследования проводятся в рамках реализации федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, направленной на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд (Гос. контракт № 16.740.11.0692 от 03.06.2011).

ЛИТЕРАТУРА

1. Эффективные малообъёмные смесители / Богданов В.В. и др. Л.: Химия, 1989. 224 с.

2. Шулаев Н.С., Николаев Е.А., Иванов С.П. Малообъёмные роторно-дисковые смесители, М.: Химия, 2009. 186 с.

3. Разработка конструкции малообъёмного роторно-дискового дезинтегратора-смесителя для получения гетерогенных смесей / Шулаев Н.С. и др. // Химическая промышленность сегодня. 2008. № 3. С. 42-44.

4. Пат. на полезную модель № 59441 Российская Федерация, МПК В02С7/08. Роторный дезинтегратор - смеситель / Шулаев Н.С., Николаев Е.А., Боев Е.В. и др. - Заявл. 14.08.06. Оpubл. 27.12.06. Бюл. № 36.

5. Пат. на полезную модель № 66228 Российская Федерация, МПК В02С7/08. Роторно – дисковый дезинтегратор - смеситель / Николаев Е.А., Шулаев Н.С., Боев Е.В. и др. - Заявл. 03.05.07. Оpubл. 10.09.07. Бюл. № 25.

6. Пат. №2414284 Р Ф, МПК В01F7/00. Диспергатор / Николаев Е.А., Шулаев Н.С., Боев Е.В. и др. - Заявл. 27.02.09., Оpubл. 20.03.11. Бюл. № 8.

7. Пат. №2414286 Р Ф, МПК В01F7/00. Осевой смеситель / Николаев Е.А., Шулаев Н.С., Боев Е.В. и др. - Заявл. 27.02.09. Оpubл. 20.03.11. Бюл. № 8.

8. Пат. №2414285 РФ, МПК В01F7/00. Гомогенизатор / Николаев Е.А., Шулаев Н.С., Боев Е.В. и др.- Заявл. 27.02.09. Оpubл. 20.03.11. Бюл. № 8.

9. Пат. №2414287 РФ, МПК В01F7/00. Роторно-дисковый гомогенизатор / Николаев Е.А., Шулаев Н.С., Боев Е.В. и др. - Заявл. 27.02.09. Оpubл. 20.03.11. Бюл. № 8.

10. А.с. СССР № 458115, МПК В01F7/10. Устройство для обработки высоковязких материалов / Исао Хайаси, Кенитиро Кондо. - Заявл. 26.04.71. Оpubл. 25.01.75. Бюл. № 3.

11. А.с. СССР № 1494956, МПК В01F7/10. Гомогенизатор / Шкарупа В.Ю., Стороженко В.Я., Панин Ю.Г., Парамонов В.И., Лыков В.Н. - Заявл. 11.05.87. Оpubл. 23.07.89. Бюл. № 27.

12. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: Теория и практика. М.: Машиностроение, 2001. 260 с.

*Николаев Е.А., канд.техн.наук, доцент кафедры «Оборудование нефтехимических заводов» филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Стерлитамак
Nikolaev E.A., cand.tech.sci., associate professor of chair «Equipment of petrochemical plants», branch of FSBEI USPTU, Sterlitamak*

Боев Е.В., канд.техн.наук, доцент кафедры «Оборудование нефтехимических заводов» филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Стерлитамак

Boev E.V., cand.tech.sci., associate professor of chair «Equipment of petrochemical plants», branch of FSBEI USPTU, Sterlitamak

*Афанасенко В.Г., канд.техн.наук, доцент кафедры «Оборудование нефтехимических заводов» филиал ФГБОУ ВПО УГНТУ, г. Стерлитамак
Afanasenko V.G. cand.tech.sci., associate professor of chair «Equipment of petrochemical plants», branch of FSBEI USPTU, Sterlitamak
e-mail: nikeevan@rambler.ru*