

## НЕКОТОРЫЕ ПРИНЦИПЫ ИЗУЧЕНИЯ МНОГОСТУПЕНЧАТОГО ГИДРОУДАРНО-КАВИТАЦИОННОГО ПРОТОЧНОГО УСТРОЙСТВА

Мещеряков И.В.

научный руководитель д-р техн. наук, проф. Анушенков А.Н.

*Сибирский федеральный университет*

Многоступенчатое гидроударно-кавитационное проточное устройство предназначено для активации материалов в процессе их смешивания, измельчения и гомогенизации. Его можно применять для обработки материалов горнодобывающей, химической, нефтяной и других отраслей промышленности [1].

Устройство применяется с целью последовательного доизмельчения поступившей фракции, состоящей из частиц определённого размера. Размер поступающих частиц конструктивно классифицируется самим устройством, что позволяет наиболее эффективно проводить процесс доизмельчения и активации.

Проточное устройство, представленное на рисунке 1 содержит входной патрубок 1 и выходной патрубок 2, корпус 3, внутри которого установлены роторы 4, 5, 6, 7 и статоры 9 четырёх ступеней, крышка 10, вал 11 и электропривод 13. Роторы, статоры и направляющие воронки 8 представляют собой колёсные пары «статор-ротор» с отверстиями в боковых стенках и рабочими камерами ступеней 12.

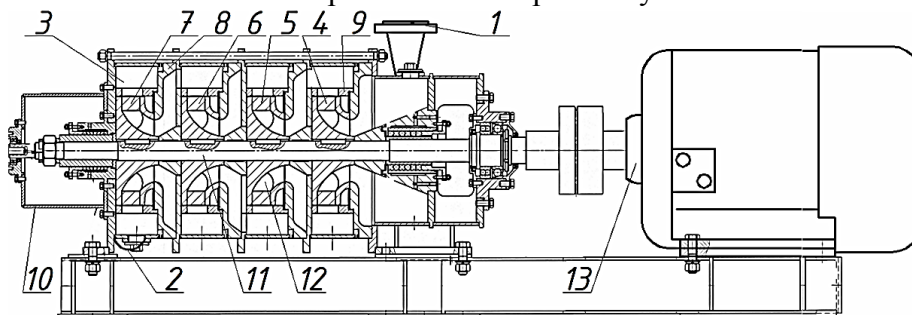


Рисунок 1 – Многоступенчатый гидроударно-кавитационное устройство

Ротор представляет собой полый цилиндр с рядом радиальных, равномерно расположенных по поверхности отверстий и направляющими, служащими для разгона жидкой составляющей. Статор выполнен в виде цилиндрического стакана и так же имеет ряд отверстий. Количество отверстий в роторах и статорах различно и направлено на создание гидроударных импульсов различной силы, вызываемых перепадами давлений при периодическом перекрывании отверстий ротора и статора.

Предварительно подготовленный материал измельчёнными частицами через входной патрубок поступает в многоступенчатое гидроударно-кавитационное устройство. В процессе функционирования материал разгоняется в направлении отверстий ротора. В момент перекрытия кольцом статора отверстий скорость движения потока резко снижается, происходит гидравлический удар, сжимающие усилия через жидкость передаются на частицы твёрдых веществ, деформируя их. В момент совмещения отверстий ротора и статора нагрузка с частицы снимается, и она испытывает деформацию растяжения.

При выходе из отверстия ротора в отверстие статора материал попадает в поле кавитационных импульсов, образованных расширением канала потока в рабочей камере. Под воздействием схлопывающихся пузырьков жидкости разрушаемая частица получает дополнительное разрушение от знакопеременных нагрузок. Большая суммарная поверхность кавитационных пузырьков обеспечивает интенсивный диффузионный обмен между жидкой и газовой фазами, в результате чего происходит

ускорение активирующих реакций. Далее через выходной патрубок готовый продукт поступает в технологический процесс производства в непрерывном проточном режиме.

С целью определения расстояния между смежными отверстиями в статоре и роторе введем следующие обозначения:  $l$  - длина окружности, по которой статор и ротор соприкасаются,  $m$ ;  $z$  - ширина отверстия в статоре и роторе,  $m$ ;  $k_c$  - число отверстий в статоре;  $k_p$  - число отверстий в роторе.

Произведение параметров  $k_c * z$  - пропускной линейный размер статора. Этот параметр так же характеризуется, как суммарная ширина. Отсюда разность  $l - k_c * z$  будет являться сумма промежутков между отверстиями. Расстояние между смежными отверстиями в статоре можно будет определить из выражения  $\frac{l - k_c * z}{k_c}$ ,  $m$ . Аналогично произведение  $k_p * z$  - суммарная ширина отверстий ротора, разность  $l - k_p * z$  - сумма промежутков между отверстиями ротора. Расстояние между смежными отверстиями в роторе определится как  $\frac{l - k_p * z}{k_p}$ ,  $m$ .

Отверстия в статоре и роторе совпадают по форме и размерам. Однако в статоре конструктивно выполнено больше отверстий, чем в роторе. Несовпадение числа отверстий связано с необходимостью стабильной и равномерной работы устройства. При не выполнении данного условия, возникает эффект сплошного гидроудара, который может привести к разрушению самого устройства.

Пусть одно из отверстий в статоре и роторе полностью совпало. Определим на какую общую разность не сойдутся отверстия по следующему выражению:

$$\frac{l - k_p * z}{k_p} - \frac{l - k_c * z}{k_c} = \left(\frac{l}{k_p} - z\right) - \left(\frac{l}{k_c} - z\right) = \frac{l}{k_p} - \frac{l}{k_c}, m. \quad (1)$$

По причине несовпадения отверстий при вращении ротора ширина щели несколько меньше ширины отверстия  $z$ . Обозначим выражение  $\frac{l}{k_p} - \frac{l}{k_c}$  как  $\Delta$ , тогда ширина 1-ой щели -  $z$ ; ширина 2-ой щели -  $z - \Delta$ ; ширина 3-ей щели -  $z - 2\Delta$  и т.д.

Выражение  $z = j * \Delta$ , означает, что если отверстие с номером  $j$  перекрывается полностью, то именно там произойдет гидроудар. Отсюда в отверстиях с номерами  $j$ ,  $3j$ ,  $5j$  и т.д. одновременно будет происходить гидроудар, т.к. в этот момент они будут полностью закрыты. Количество полностью открытых и полностью закрытых отверстий в которых происходит гидроудар определится из выражения  $\frac{k_c * z}{2(j+1)}$ .

Определим пропускную способность ступени «статор-ротор». Пропускная способность с 0 - го по  $j$  - ое отверстие будет равна:  $\frac{z * (j+1)}{2}$ . Тогда общая проходная ширина определится по выражению:

$$\frac{k_c * z * (j+1)}{j+1} = \frac{z * k_c}{2}, m. \quad (2)$$

Полученное значение так же будет являться суммарной проходной способностью.

Если сдвинем ротор на некоторую величину  $E < \Delta$ , то все отверстия до  $j$  - го уменьшатся на величину  $E * j$ , а отверстия от  $j$  до  $2j$  увеличатся на эту же величину. Сумма отверстий, т.е. пропускная способность ступени, изменяться не будет.

Пропускная способность  $\Delta$  определяется через параметры  $z$  и  $k$ . Из выражения  $z = j * \Delta$  получим:

$$\Delta = \frac{z}{j} \quad (3)$$

Частота ступени связана с параметром  $k$ , а параметр  $z$  связан с первоначальными размерами частиц, которые являются исходными значениями. Чем больше величина  $\Delta$ , тем меньше  $j$  (номер полностью закрытого отверстия). Величиной  $\Delta$

регулируемое количество самих гидроударов. Чем больше закрылось отверстие, тем сильнее гидроудар.

После экспериментального определения расхода устройства и вычислив значения сечения щели можно определить среднюю скорость истечения смеси. Для вычисления давления полученную скорость необходимо подставить в формулу Жуковского:

$$p = \rho(V_1 - V_0)a, \text{ Н/м}^2, \quad (4)$$

где:  $\rho$  – плотность суспензии,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_1$  и  $V_0$  – скорость движения потока в отверстии ротора до и после перекрытия,  $\text{м/с}$ ;  $a$  – скорость распространения ударной волны в отверстии ротора, равная скорости распространения звука в суспензии,  $\text{м/с}$  [2].

С точки зрения ёмкости всего устройства частоты гидроударов можно классифицировать по двум основным группам: частота для отверстий и частота для межлопастной части устройства. При чём частота для межлопастной части устройства будет в  $j+1$  раз выше, чем у отверстий.

Силу гидроударного сжатия частиц  $p$  так же можно определить по формуле Жуковского. Пренебрегая ничтожно малыми конечными скоростями пусть  $V_0 = 0$   $\text{м/с}$ . Тогда  $V_1$  определится из выражения:

$$V_1 = \frac{2Q}{m \cdot z \cdot k_c}, \text{ м/с}$$

где:  $Q$  – расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $m$  – длина отверстия,  $\text{м}$  (5)

Если величина  $p$  будет превышать прочность частицы, то это приведёт к её разрушению. При  $p$  меньшем прочности частицы для достижения требуемого результата частица будет разрушена только при многократном повторении процесса диспергации, либо при условии прохождения через несколько ступеней устройства.

Обозначим толщину стенки ротора (глубина отверстия) –  $h$ ,  $\text{м}$ ; скорость суспензии  $V_1$ ,  $\text{м/с}$ ; время движения частицы в отверстии ротора –  $t$ ,  $\text{сек}$ . Тогда время прохождения частицы через отверстие ротора определится:  $t = \frac{h}{V_1}$ ,  $\text{сек}$ .

Для расчёта частоты гидроударных импульсов в отверстии ротора воспользуемся следующей формулой:

$$f = n \cdot k_c, \text{ об./мин.} \quad (6)$$

где:  $n$  – частота вращения ротора,  $\text{об./мин.}$ ;  $k_c$  – количество отверстий в статоре.

Частота гидроударных импульсов в отверстии статора определится по аналогичной формуле  $f = nk_p$  ( $k_p$  – количество отверстий в роторе).

Тогда время между ударами в отверстии определится как  $t' = \frac{1}{f}$ ,  $\text{сек}$ . Если  $t = t'$ , то частица испытает всего один гидроудар (один в роторе, другой в статоре). Если  $t < t'$ , то частица испытает некоторое количество гидроударов. Если  $t > t'$ , то часть суспензии пройдёт насквозь через отверстия и щели статора и ротора и вообще не испытает гидроудара.

На эффективную работу устройства влияет параметр характеризующий волны увеличения и уменьшения давления. Волна увеличения давления обусловлена явлением гидроудара. Волна уменьшения давления возникает в следствии того, что в отверстии ротора происходит повышение давления, что в свою очередь приводит к понижению давления в самом отверстии статора. При чём частота на сжатие в роторе определится как  $k_p \cdot n$ , а частота на разряжение в статоре как  $k_c \cdot n$ . Понижение давления в большей мере способствует положительному эффекту разрушения частицы, так как разрушающее воздействие на растяжении более эффективно, чем на сжатие [3].

Все выше приведённые параметры и условия характерны для каждой ступени многоступенчатого устройства.

Определим минимально необходимое количество отверстий в статоре и роторе каждой из ступеней устройства для выполнения условия роста импульсной частоты на

каждой последующей ступени. Так как все ступени находятся на одном общем валу и поб./мин. у всех ступеней одинаково, то для того чтобы увеличить частоту каждой последующей ступени необходимо исходить из условия  $2f=n*2k$ . То есть необходимо пропорционально увеличить число отверстий. При этом так же требуется и пропорционально уменьшить размер самих отверстий для того, чтобы пропускная способность каждой ступени осталась неизменной. Таким образом, исходя из вышесказанного, для каждой последующей ступени необходимо в 2 раза увеличить количество отверстий, но и, соответственно, в 2 раза уменьшить ширину самих отверстий.

Исходя из того, что в каждой из ступеней будет сохраняться условие  $V_1^{1\text{ступени}}=V_1^{2\text{ступени}}=V_1^{3\text{ступени}}=V_1^{4\text{ступени}}$ , то и  $p$  давление гидроудара будет везде одинаковое  $p_1^{1\text{ступени}}=p_1^{2\text{ступени}}=p_1^{3\text{ступени}}=p_1^{4\text{ступени}}$ .

На эффективное разрушение частицы так же оказывает влияния такой параметр, как резонансное разрушения частицы при нескольких последовательных гидроударных импульсах. Такие импульсы совпадают с частотой собственных колебаний частицы, что приводит к возникновению эффекта резонанса, который положительно влияет на процесс разрушения частицы.

Таким образом, на эффективную работу многоступенчатого гидроударно-кавитационного проточного устройства оказывает влияние целый ряд параметров: число и размер отверстий в статоре и роторе, пропускная способность ступени, частота вращения ротора, исходный размер поступающей на доизмельчение частицы, давление гидроудара, интенсивность диффузионного обмена между воздушной и жидкой средами, достаточность импульсов для резонансного разрушения частицы, частота на разряжение в статоре и сжатие в роторе.

В зависимости от требуемого гранулометрического состава суспензии подбирается число ступеней устройства и частотные характеристики каждой из них. Для создания эффективного процесса смешивания и доизмельчения в многоступенчатом устройстве предусматривается такая последовательность конструктивно различных колесных пар, которая позволяет получать высокодисперсные, активированные однородные системы.

### **Список использованной литературы**

1 Гидроударно-кавитационный диспергатор для приготовления углерод-углеродных композиций: пат. 2317849 РФ / Фризоргер В.К., Анушенков А.Н., Храменко С.А.. Опубл. 2008, Бюл. № 6.

2 Червяков В.М., Однолько В.Г. Использование гидродинамических и кавитационных явлений в роторных аппаратах. – М.: Машиностроение, 2008. – 116 с.

3 Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение, 2001. С. 76-134.