

## ОСНОВЫ МЕТОДА РАСЧЕТА РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНО-КАВИТАЦИОННОГО АППАРАТА

**М.А. Промтов**

*Кафедра «Машины и аппараты химических производств», ТГТУ*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** роторный импульсно-кавитационный аппарат; удельная энергия.

**Аннотация:** Предложена концепция расчета пульсационных аппаратов роторного типа. Рассмотрен алгоритм расчета универсального роторного импульсно-кавитационного аппарата. В качестве основных критериев приняты удельные энергии импульса давления, пульсационного и кумулятивного воздействий.

### Обозначения

$a$ – ширина каналов ротора и статора, м;	$R_p$ – внешний радиус ротора аппарата, м;
$B$ – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, линейно зависящие от скорости потока;	$R_{\max}$ – максимальный радиус кавитационного пузырька, м;
$b$ – расстояние между соседними стенками каналов, м;	$S$ – площадь поперечного сечения канала статора, м <sup>2</sup> ;
$c$ – скорость звука, м/с;	$T, t$ – время, с;
$d_3$ – эквивалентный диаметр, м;	$t_3$ – время схлопывания кавитационного пузырька, с;
$h$ – высота каналов ротора и статора, м;	$V$ – скорость потока жидкости в канале статора, м/с;
$K$ – индекс кавитации;	$z$ – число каналов;
$k$ – коэффициент;	$\beta$ – коэффициент количества движения;
$l_c$ – длина канала статора, м;	$\delta$ – величина зазора между ротором и статором, м;
$l_p$ – длина канала ротора, м;	$\varepsilon$ – энергия в единице объема, Дж/м <sup>3</sup> ;
$l_3$ – эквивалентная длина, м;	$\xi$ – коэффициент гидравлического сопротивления;
$Q$ – расход жидкости через аппарат, м <sup>3</sup> /с;	$\varphi$ – коэффициент проскальзывания жидкости относительно поверхности ротора;
$P$ – давление, Па;	$\lambda$ – коэффициент сопротивления трению;
$P_k$ – давление в канале статора, рабочей камере, Па;	$\mu$ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;
$P_n$ – давление насыщенных паров жидкости, Па;	$\rho$ – плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> ;
$P_p$ – давление на входе в полость ротора, Па;	$v$ – объем жидкости, м <sup>3</sup> ;
$\Delta P$ – перепад давления между выходом из канала полостью ротора и рабочей камерой аппарата, Па;	$\omega$ – угловая скорость вращения ротора, с <sup>-1</sup> .
$R_0$ – начальный радиус кавитационного пузырька, м;	
$R_k$ – радиус рабочей камеры, м;	

В настоящее время перспективным научно-техническим направлением является разработка роторных импульсно-кавитационных аппаратов, которые применяются для интенсификации процессов эмульгирования, диспергирования, гомогенизации, растворения, экстрагирования, абсорбции и др. [1 – 4].

При разработке метода расчета пульсационных аппаратов роторного типа необходимо различать две задачи: расчет и проектирование универсального аппа-

рата, предназначенного для проведения химико-технологических процессов в жидких средах; расчет и проектирование аппарата, предназначенного для конкретного процесса. При решении первой задачи, когда проектируется многофункциональный аппарат, в расчет необходимо принимать, в первую очередь, натуральные и относительные критерии, а затем уже экономические, то есть, сначала необходимо оперировать критериями, показывающими техническую и технологическую эффективность, а затем при прочих равных условиях минимизировать затраты на изготовление аппарата. При решении второй задачи, когда технологическая цепочка и технологический цикл полностью определены, необходимо проводить расчет с использованием экономических критериев, например, сроком окупаемости капитальных вложений и годовым экономическим эффектом [5].

Универсальные пульсационные аппараты роторного типа обычно используются в малотоннажном производстве с широким спектром номенклатуры производимых продуктов и для решения исследовательских задач. В крупном промышленном производстве, а также, когда оправдано применение аппарата для проведения только одного технологического процесса, наиболее эффективным является использование специально спроектированного пульсационного аппарата роторного типа для данного технологического процесса. Универсальные пульсационные аппараты роторного типа проектируются таким образом, чтобы были задействованы и давали наибольшую отдачу основные факторы воздействия на жидкую гетерогенную обрабатываемую среду.

Основными факторами воздействия на обрабатываемую среду в пульсационном аппарате роторного типа являются:

1) механическое воздействие на частицы гетерогенной среды, которое проявляется в ударных, срезающих и истирающих нагрузках при контакте с рабочими частями аппарата, больших сдвиговых напряжениях в жидкости, кумулятивных эффектах;

2) гидродинамическое воздействие, которое включает в себя пульсации давления и скорости потока жидкости при импульсном вводе в канал статора, развитую турбулентность потока;

3) гидроакустическое воздействие, заключающееся в микропульсациях кавитационных пузырьков, генерировании сферических ударных волн, вторичных нелинейных акустических эффектах.

Механический фактор воздействия редко бывает определяющим, так как пульсационные аппараты роторного типа неэффективны по сравнению со специальными машинами для разрушения твердых частиц. Как правило, механическое воздействие является вспомогательным в таких процессах как растворение, экстрагирование, эмульгирование и т.п.

Сформулируем алгоритм расчета универсального пульсационного аппарата роторного типа, основными факторами воздействия в котором являются гидродинамическое и гидроакустическое воздействия. Такие аппараты называют роторными импульсно-кавитационными аппаратами [6] или аппаратами с модуляцией потока [7] (далее аппараты).

Для того, чтобы максимально приблизиться к экономическим критериям расчета, рассмотрим, от чего зависят основные капитальные и эксплуатационные затраты на изготовление и функционирование аппарата. Капитальные затраты на изготовление аппарата зависят, в основном, от геометрических параметров аппарата, точности изготовления и сборки, стоимости материала, комплектующих изделий и т.п. Стоимость материала и комплектующих изделий слабо поддается оптимизации, так как не зависит от проектировщика. Включение в проект материала невысокого качества не может служить методом оптимизации затрат. Основными параметрами, от которых зависят габариты аппарата в целом и деталей в

отдельности являются, внешний радиус ротора  $R_p$ ; длина канала статора  $l_c$ ; радиус рабочей камеры  $R_k$ ; высота каналов ротора  $h_p$ , статора  $h_c$  и рабочей камеры  $h_k$ . Точность изготовления и сборки зависит от точности изготовления каждой детали и от основных геометрических размеров аппарата, а также от величины зазора между ротором и статором  $\delta$ .

Эксплуатационные затраты для эффективного функционирования аппарата, в основном, зависят от потребляемой энергии и от энергии, расходуемой на подачу обрабатываемой жидкости под давлением. Текущие технологические и ремонтные затраты во внимание принимать не будем. Таким образом, при минимизации эксплуатационных затрат следует оптимизировать: потребляемую мощность  $N$ ; расход жидкости  $Q$ ; давление в полости ротора  $P_p$ .

Проведем анализ критериев эффективности аппарата, по которым можно произвести оптимизацию, добиваясь максимальной эффективности работы аппарата. Основными факторами воздействия на жидкую гетерогенную среду являются импульсное и кавитационное воздействия. Параметрами, характеризующими импульсное и кавитационное воздействия, служат: удельная энергия импульса давления  $\varepsilon_{и}$ ; удельная энергия пульсационного воздействия  $\varepsilon_{п}$ ; удельная энергия кумулятивного воздействия  $\varepsilon_{к}$ . Эти параметры можно определить по формулам [1, 7]:

$$\varepsilon_{и} = \frac{S^2}{2\pi c t \nu} \int_0^t \left( \frac{dV}{dt} \right)^2 dt;$$

$$\varepsilon_{п} = \frac{P_k K 0,75}{t_3 \rho} \left( 1 - \frac{R_0^3}{R_{\max}^3} \right) \left( \frac{R_0}{R_{\max}} \right)^2;$$

$$\varepsilon_{к} = 0,02 \frac{P_k K}{R_{\max} \rho \sqrt{\rho/P_k}}.$$

Для интенсификации химико-технологических процессов необходимо, чтобы эти параметры имели как можно большую величину. То есть  $\varepsilon_{и} \rightarrow \max$ ,  $\varepsilon_{п} \rightarrow \max$ ,  $\varepsilon_{к} \rightarrow \max$ .

Бесконечно увеличивать энергию, вводимую в обрабатываемый объем жидкости невозможно и в этом случае необходимо ввести параметр, который бы уравновешивал стремление интенсифицировать химико-технологический процесс (ХТП) чисто энергетическим способом. Примем, что основным управляющим параметром будет угловая скорость ротора, тогда, в качестве уравновешивающего параметра, введем мощность, необходимую для вращения ротора  $N$ , которая рассчитывается в соответствии с рекомендациями в работах [1, 8]. Расход энергии на вращение ротора зависит от угловой скорости ротора  $\omega$ ; радиуса ротора  $R_p$ ; высоты ротора  $h_p$ ; ширины и количества каналов в роторе  $a_p$ ,  $z_p$ ; величины зазора между ротором и статором  $\delta$ ; физических характеристик гетерогенной жидкости. Для упрощения задачи принимаем  $a_p = a_c = a$ ,  $h_p = h_c = h$ ,  $z_p = z_c = z$ .

Уравновешивающий параметр необходимо минимизировать, то есть,  $N_3 \rightarrow \min$ . Так как расход жидкости и давление, создаваемое насосом являются неизменными для каждого типа насоса, переведем параметры  $Q$  и  $P_p$  в разряд постоянных параметров.

Сформулируем задачу инженерного расчета аппарата с оптимальными параметрами. Необходимо найти такие режимные и геометрические параметры аппарата, чтобы потребляемая энергия, необходимая для вращения ротора и подачи жидкости была минимальной, а удельные энергии импульсного, пульсационного и кумулятивного воздействий были не ниже заранее заданных значений. Заранее задаются и считаются постоянными следующие величины:  $Q$ ,  $P_p$ ,  $\rho$ ,  $\mu$ . Оптимизация проводится по восьми переменным:  $a$ ,  $h$ ,  $z$ ,  $\delta$ ,  $R_p$ ,  $\omega$ ,  $l_p$ ,  $l_c$ . Каждая из переменных ограничена сверху и снизу, а  $z$  является целочисленной величиной. Задача является многокритериальной, учитывающей несколько противоречивых экстремальных показателей. Такие задачи решаются адаптивными методами многокритериальной оптимизации [9].

В качестве основного уравнения, закладывающего базу для расчета многих кинематических и динамических параметров, служит нестационарное уравнение Бернулли [1, 2]

$$\beta(t)l_3 \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2} \left( \xi(t) + \frac{\lambda(t)l_3}{d_3} + \frac{B(t)\mu}{d_3\rho V} \right) = \frac{\Delta P(t)}{\rho}.$$

Численное решение этого уравнения позволяет определить зависимости  $dV/dt$ ,  $V(t)$ ,  $\Delta P(t)$ . По этим зависимостям можно определить значения кинематических и динамических параметров потока жидкости, необходимые для расчета удельной энергии воздействий

$$V = \frac{1}{t} \int_0^t V(t) dt; \quad \Delta P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta P(t) dt; \quad v = S \int_0^t V(t) dt; \quad S = ah; \quad T = \frac{a+b}{\omega R_p};$$

$$t = 2a/(\omega R_p); \quad l_3 = l_c + l_p + \delta; \quad d_3 = 2ah/(a+h);$$

$$P_k = P_p + l_p \omega^2 (R_p - l_p/2) \rho + \omega^2 \rho (R_p - l_p)^2 (1-\varphi) - \Delta P_{cp}.$$

Для определения максимального радиуса пузырька  $R_{max}$  используются уравнения динамики кавитационного пузырька, индекс кавитации  $K$  определяется по эмпирическому уравнению [1].

Для решения данной задачи необходимо выбрать метод оптимизации. Как правило, методы оптимизации рассматриваются как методы поиска экстремума целевой функции. К таким методам относятся градиентные и безградиентные методы поиска экстремума функции. В градиентных методах используют значения частных производных функций, а в безградиентных они не используются.

Целевую функцию представим в виде линейно свернутого интегрального показателя

$$F(\omega, \delta, a, h, z, R_p, l_c) = k_1 N(\omega, \delta, a, h, z, R_p) - k_2 \varepsilon_{п}(\omega, \delta, a, h, l_c, R_p) - k_3 \varepsilon_{к}(\omega, \delta, a, h, l_c, R_p) - k_4 \varepsilon_{п}(\omega, \delta, a, h, l_c, R_p);$$

$$F(\omega, \delta, a, h, l_c, R_p, z) \rightarrow \min.$$

Здесь  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ ,  $k_4$  – весовые коэффициенты, от выбора которых зависит, какой именно из параметров оптимизации представляет для проектировщика наибольший интерес. Варьируя этими коэффициентами можно выбирать в качестве приоритета либо потребляемую энергию, либо один или несколько показателей эффективности воздействия на обрабатываемую гетерогенную жидкость.

Еще раз необходимо отметить, что, несмотря на оптимизирующий расчет, задача является многовариантной в зависимости от значений весовых коэффициентов. Подбор весовых коэффициентов является сложным этапом в методе расчета и правильный выбор этих коэффициентов наиболее вероятен при использовании специальных процедур поиска оптимального решения в диалоговом режиме [9] или после накопления определенного опыта и соответствующего анализа результатов расчета при различных значениях весовых коэффициентов. В любом случае выбор весовых коэффициентов зависит от лица принимающего решение (эксперта) и от параметров поставленной задачи, определяемых техническим заданием, техническими требованиями и т.п.

#### *Список литературы*

1. Промтов М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика. М.: Машиностроение, 2001. 260 с.
2. Балабышко А.М., Зимин А.И., Ружицкий В.П. Гидромеханическое диспергирование. М.: Наука, 1998. 330 с.
3. Балабышко А.М., Юдаев В.Ф. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности. М.: Недра, 1992. 176 с.
4. Богданов В.В., Христофоров Е.И., Клоцунг Б.А. Эффективные малообъемные смесители. Л.: Химия, 1989. 224 с.
5. Промтов М.А. Анализ критериев оценки интенсивности химико-технологических процессов и эффективности химико-технологической аппаратуры // Вестник ТГТУ. 1998, Т. 4, № 4. С. 516 – 521.
6. Промтов М.А. Гидроакустическое эмульгирование в роторном импульсно-кавитационном аппарате // Теор. основы хим. технол. 2001, Т. 35, № 3. С. 327 – 330.
7. Карепанов С.К., Карнаух М.А., Серова М.А., Юдаев В.Ф. Аппараты с переходными гидромеханическими процессами и их характеристики // Хим. и нефтегаз. машиностроение. 2001, № 12. С. 3 – 6.
8. Промтов М.А. Исследование гидродинамических закономерностей работы роторно-импульсного аппарата // Теор. основы хим. технол. – 2001, Т. 35, № 1. С. 103 – 106.
9. Растринин Л.А., Эйдук Я.Ю. Адаптивные методы многокритериальной оптимизации // Автоматика и телемеханика. 1985, № 1. С. 5 – 26.

---

## **Foundations of Method of Calculating Rotor Impulse-Cavitation Apparatus**

**M.A. Promtov**

*Department "Machines and Apparatuses of Chemical Engineering", TSTU*

**Key words and phrases:** rotor impulse-cavitation apparatus; specific energy.

**Abstract:** Concept of calculating pulse apparatuses of rotor type is proposed. The algorithm of calculating universal rotor impulse-cavitation apparatus is considered. Specific energy of pressure impulse, pulse and cumulative influence is taken as basic criterion.

## **Grundlagen der Berechnungsmethode des Rotorimpulskavitationsapparats**

**Zusammenfassung:** Es ist die Berechnungskonzeption der Pulsationsapparate des Rotortypus vorgeschlagen. Es ist der Algorithmus der Berechnung des universellen Rotorimpulskavitationsapparats betrachtet. Für die Hauptkriterien sind die spezifischen Energien des Druckimpulses, der Pulsations- und Kumulativeinwirkungen gehalten.

---

### **Les fondements de la méthode du calcul de l'appareil rotor d'impulsion et de cavitation**

**Résumé:** Est proposée la conception du calcul des appareils de pulsation du type rotor. Est examiné l'algorithme du calcul de l'appareil rotor d'impulsion et de cavitation universel. En qualité de critères essentiels sont admises les énergies spécifiques de l'impulsion de pression, des actions de pulsation et de cumulation.

---