

## КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА РАСЧЕТА РОТОРНОГО ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

М.А. Промтов, А.Ю. Степанов

*Кафедра «Техносферная безопасность», ГОУ ВПО «ТГТУ»;  
mahp@tambov.ru*

*Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым*

**Ключевые слова и фразы:** импульсное давление; компьютерная система; мощность; роторный импульсный аппарат; число кавитации.

**Аннотация:** Разработаны алгоритм и компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата радиального типа. В качестве критериев расчета приняты значения амплитуды импульса давления, потребляемой мощности, расхода обрабатываемой жидкости и числа импульсной акустической кавитации.

Обозначения	
$a_{p, c}$ – ширина каналов ротора и статора, м; $d_3$ – эквивалентный диаметр канала статора, м; $B_n(t)$ – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, линейно зависящие от скорости потока; $A, B, a, b$ – эмпирические коэффициенты; $h_{p, c}$ – высота каналов ротора и статора, м; $l_c$ – длина канала статора, м; $l_p$ – длина канала ротора, м; $l$ – длина прерывателя, м; $N$ – мощность, Вт; $n$ – число оборотов ротора в минуту; $Q$ – расход жидкости через аппарат, м <sup>3</sup> /с; $P_n$ – импульсное давление, Па; $P_c$ – давление в камере статора, Па; $P_n$ – давление насыщенных паров жидкости, Па; $P_p$ – давление в полости ротора, Па; $\Delta P$ – перепад давления между полостью ротора и камерой статора, Па;	$R_c$ – радиус камеры статора, м; $R_p$ – внешний радиус ротора, м; $S$ – площадь поперечного сечения канала статора, м <sup>2</sup> ; $T, t$ – время, с; $t_{ж}$ – температура жидкости, °С; $v$ – скорость потока жидкости в канале статора, м/с; $z$ – число каналов; $\beta$ – коэффициент количества движения; $\delta$ – величина зазора между ротором и статором, м; $\xi$ – коэффициент гидравлического сопротивления; $\lambda$ – коэффициент сопротивления трению; $\mu$ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; $\rho$ – плотность жидкости, кг/м <sup>3</sup> ; $\omega$ – угловая скорость вращения ротора, с <sup>-1</sup> ; $\chi$ – число импульсной акустической кавитации.

Роторные импульсные аппараты (**РИА**) – это эффективное оборудование для многофакторного импульсного воздействия на гетерогенную жидкость с целью получения стабильных, высокодисперсных эмульсий и суспензий, интенсификации процессов растворения и экстрагирования веществ, изменения физико-химических параметров жидкости, деструкции молекулярных соединений [1–12].

Одним из основных конструктивных признаков РИА является исполнение ротора и статора в форме дисков (осевые) или цилиндров (радиальные). В первом случае каналы для прохода жидкости соосны с осью вращения ротора, во втором – находятся в цилиндрических стенках ротора и статора, течение потока жидкости через каналы проходит в радиальном направлении. Преимуществом конструкции радиального типа является создание центробежных сил, действующих на жидкость внутри полости ротора.

Наиболее часто РИА рассчитывают по критерию наибольшего воздействия на обрабатываемую жидкость при наименьших затратах на потребляемую энергию при заданной производительности. В качестве параметров, определяющих степень воздействия на обрабатываемую жидкость, целесообразно принять амплитуду импульса давления, генерируемого в канал статора и число импульсной акустической кавитации.

Импульсное давление, генерируемое в канал статора определяется по формуле [2]

$$P_{\text{и}}(t) = \rho \frac{dv}{dt} \left[ \frac{S}{2\pi} \right]^{0,5}, \quad (1)$$

где  $S = a_c h_c$ .

Математическая модель, достаточно полно отражающая основные закономерности нестационарных гидромеханических процессов в канале статора аппарата, базируется на уравнении Бернулли, записанном в нестационарной форме [1, 2]

$$\beta l \frac{dv}{dt} + \lambda(t) \frac{lv^2}{2d_3} + \xi(t) \frac{v^2}{2} + \frac{B_{\text{и}}(t)\mu v}{2d_3\rho} = \frac{\Delta P}{\rho}, \quad (2)$$

где  $l = l_c + \delta + l_p$  – длина прерывателя потока, м;  $d_3 = 2a_c h_c / (a_c + h_c)$  – эквивалентный диаметр канала статора, м.

Нестационарное уравнение Бернулли позволяет определить скорость  $v(t)$ , ускорение  $dv/dt$ , расход жидкости  $Q(t)$  и амплитуду импульсов давления  $P_{\text{и}}(t)$  в канале статора. Методы решения уравнения (2) приведены в [1, 2].

Одним из основных параметров, характеризующих интенсивность кавитационного воздействия на обрабатываемую жидкость является число импульсной акустической кавитации [1, 2, 12].

На основании расчетных значений скорости и давления в канале статора можно определить расчетное импульсное акустическое число кавитации [11, 12]

$$\chi = \frac{P_c - P_{\text{и}}}{P_{\text{и}}(\text{max})}. \quad (8)$$

Если  $\chi > 1$ , то кавитация слаборазвита, при  $\chi < 1$  интенсивность кавитации возрастает с уменьшением  $\chi$ . Чем меньше значение  $\chi$ , тем интенсивнее кавитация.

Методики расчета параметров РИА представлены в работах [1–9]. Рассмотрим 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. Основными параметрами, от которых зависят габариты аппарата в целом и его деталей в отдельности, являются: внешний радиус ротора  $R_p$ ; длина канала статора  $l_c$ ; радиус каме-

ры статора  $R_c$ ; высоты каналов ротора  $h_p$  и камеры статора  $h_c$ . 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 РИА и от энергии, расходуемой на подачу жидкости под давлением в РИА.

Текущие технологические и ремонтные затраты во внимание не принимаются. Таким образом, при минимизации капитальных и эксплуатационных затрат следует оптимизировать: потребляемую мощность  $N$ ; расход жидкости  $Q$ ; амплитуду импульсов давления  $P_H(t)$  и число импульсной акустической кавитации  $\chi$ . При расчете и проектировании РИА необходимо стремиться минимизировать  $N$  и  $\chi$ , стремиться к наибольшему значению амплитуды  $P_H(t)$ , выдерживать  $Q$  не менее заданного.

Расход жидкости через каналы ротора и статора за один цикл их совмещения определяется по формулам:

$$Q_{cp1} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} Q(t) dt; \quad Q(t) = v(t)S(t). \quad (3)$$

Расход через один канал статора при транзитных течениях жидкости через зазор между ротором и статором определяется по формуле

$$Q_{cp2} = \frac{1}{T - \tau} \int_{\tau}^T Q(t) dt. \quad (4)$$

Общий расход через все каналы  $z$  статора  $Q_{об}$  равен

$$Q_{об} = Q_{cp} z^2 n 60, \quad (5)$$

где  $Q_{cp} = Q_{cp1} + Q_{cp2}$ ;  $n$  – число оборотов ротора в минуту.

Для учета центробежной силы и вязкости жидкости при ее течении в полости ротора необходимо ввести поправочную функцию  $f(\omega R_p, \mu)$  для расчета расхода жидкости через РИА

$$Q = Q_{об} + f(\omega R_p, \mu). \quad (6)$$

Экспериментальные исследования влияния параметров  $\omega$ ,  $\mu$  и  $R_p$  на расход  $Q$  позволили определить вид функции  $f(\omega R_p, \mu)$ :

$$f(\omega R_p, \mu) = 3,5 \cdot 10^{-4} \omega R_p^3 - 0,02 \omega R_p^2 + 0,25 \omega R_p + 3d_{1,2};$$

$$d_1 = 1 (\mu = 0,001/0,03 \text{ Па} \cdot \text{с});$$

$$d_2 = 0,1 (\mu = 0,031/0,07 \text{ Па} \cdot \text{с}).$$

В соответствии с методом расчета потребляемой мощности, предложенным в [5]

$$N = A \text{Re}^{-B} \left( \frac{\delta}{R_p} \right)^{0,2} \left( \frac{az}{R_p} \right)^{0,7} \omega^3 \rho R_p^4 h_p, \quad (7)$$

где  $A = av$ ;  $B = bv$ ;  $\text{Re} = \omega R_p^2 / \nu$ .

Используя результаты расчета по формуле (7) и сопоставляя их с экспериментальными данными, были получены эмпирические коэффициенты, которые равны:

- для маловязких жидкостей ( $\mu = 0,001/0,03 \text{ Па} \cdot \text{с}$ )  $a = 8,5 \cdot 10^9$ ;  $b = 3,6 \cdot 10^5$ ;
- для вязких жидкостей ( $\mu = 0,031/0,07 \text{ Па} \cdot \text{с}$ )  $a = 2,24 \cdot 10^{10}$ ;  $b = 1,73 \cdot 10^4$ .

Алгоритм расчета параметров РИА реализован в программных продуктах «Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа» и «Программа расчета полей скоростей и давлений в каналах роторного импульсного аппарата», созданных на базе Microsoft Visual Basic 6.0 [13, 14].

Интерфейс программы «Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа» представлен на рис. 1.

В левой части окна находится: список входных параметров; их обозначение; текстовые окна для ввода численных значений параметров.

При наведении курсора на название вводимого параметра выводится подсказка о диапазоне допустимых значений параметра (рис. 2).

В левом нижнем углу основного окна программы приведена легенда графического окна.

В центральной части окна приведена система координат для построения графиков зависимостей. В данной системе координат ось абсцисс – шкала времени с ценой деления  $1 \cdot 10^{-5}$  с, а по оси ординат приведены 4 шкалы:

- 1) в левом верхнем углу – шкала скорости потока, с ценой деления 1 м/с;
- 2) в правом верхнем углу – шкала расхода с ценой деления  $5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{с}$ ;
- 3) в правом нижнем углу – шкала ускорения потока с ценой деления  $1 \cdot 10^4 \text{ м}/\text{с}^2$ ;
- 4) в левом нижнем углу – шкала давления в потоке с ценой деления 0,01 МПа.

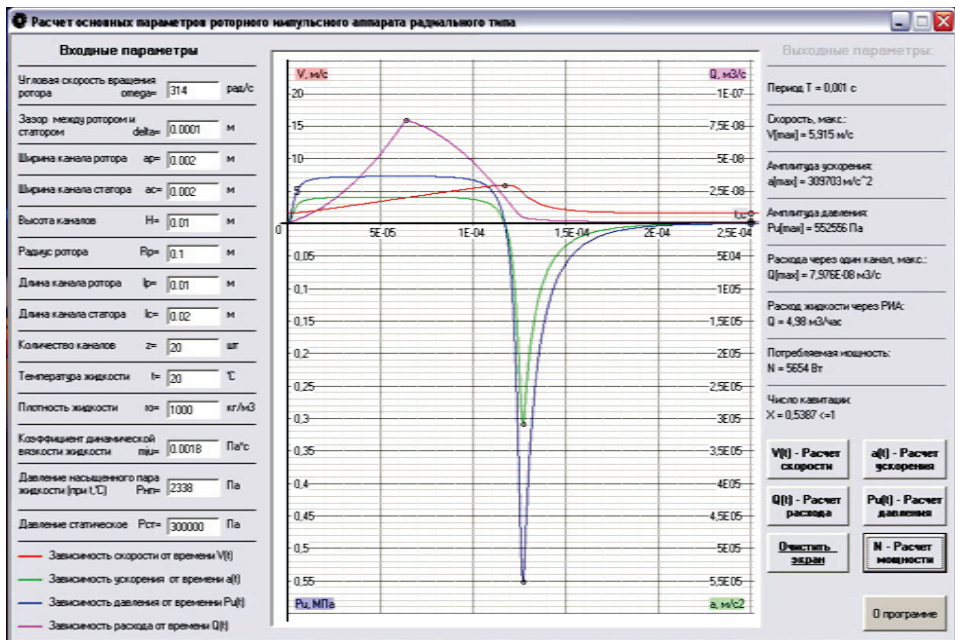


Рис. 1. Интерфейс программы «Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа»

В системе координат, в результате решения уравнения с введенными входными параметрами, отображаются графические зависимости скорости, ускорения, расхода, давления. Точки на графиках (изображены окружностями), соответствуют экстремальным значениям функций. Значения графиков функций в этих точках выводятся числовыми значениями в текстовых окнах в правой части основного окна программы (рис. 3).

В правом верхнем углу основного окна программы выводятся численные значения рассчитанных параметров: амплитудные значения скорости, ускорения, расхода, давления; период совмещения канала ротора с каналом статора; полный расход через РИА; потребляемая мощность; число импульсной акустической кавитации.

В правом нижнем углу расположена панель управления расчетами (рис. 4).

Кнопки «Расчет скорости», «Расчет ускорения», «Расчет расхода», «Расчет давления» осуществляют расчет соответствующих зависимостей, выводят графики на систему координат и отображают численные значения в текстовом поле выходных параметров. Данные кнопки также служат для обновления (пересчета модели) при изменении входных параметров. Таким образом, существует возможность одновременного отображения нескольких графиков одной и той же зависимости при различных входных параметрах. Кнопка «Расчет мощности» осуществляет расчет потребляемой мощности и выводит результат в текстовом поле выходных параметров.

Для удаления графических зависимостей с системы координат служит кнопка «Очистить экран». Кнопка «О программе» выводит на экран окно с информацией о названии программы, версией, разработчиках программы.

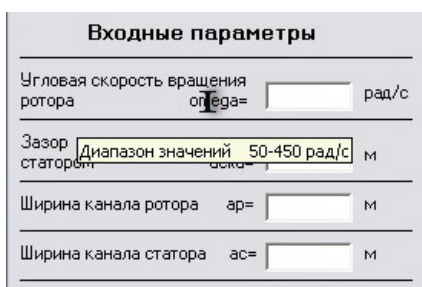


Рис. 2. Фрагмент интерфейса для ввода значений параметров

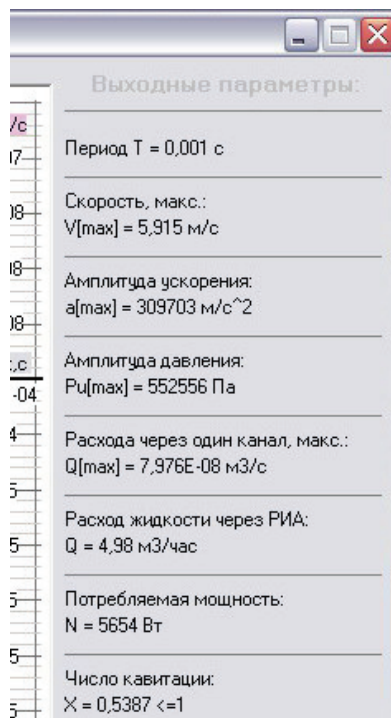


Рис. 3. Фрагмент окна интерфейса с численными значениями результатов расчета



Рис. 4. Панель управления расчетами

### Список литературы

1. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М.А. Промтов. – М. : Машиностроение, 2001. – 260 с.
2. Балабышко, А.М. Гидромеханическое диспергирование / А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Ружицкий. – М. : Наука, 1998. – 330 с.
3. Балабышко, А.М. Роторные аппараты с модуляцией потока и их применение в промышленности / А.М. Балабышко, В.Ф. Юдаев. – М. : Недра, 1992. – 176 с.
4. Богданов, В.В. Эффективные малообъемные смесители / В.В. Богданов, Е.И. Христофоров, Б.А. Клоцунг. – Л. : Химия, 1989. – 224 с.
5. Балабудкин, М.А. Роторно-пульсационные аппараты в химико-фармацевтической промышленности / М.А. Балабудкин. – М. : Медицина, 1983. – 160 с.
6. Промтов, М.А. Основы метода расчета роторного импульсно-кавитационного аппарата / М.А. Промтов // Вест. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2004. – Т. 10, № 1А. – С. 149–154.
7. Аппараты с переходными гидромеханическими процессами и их характеристики / С.К. Карепанов [и др.] // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2001. – № 12. – С. 3–6.
8. Червяков, В.М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М. : Машиностроение-1, 2007. – 128 с.
9. Червяков, В.М. Определение энергозатрат в роторных аппаратах / В.М. Червяков, А.А. Коптев // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2005. – № 4. – С. 73–77.
10. Промтов, М.А. Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа / М.А. Промтов // Хим. и нефтегаз. машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 13–15.
11. Биглер, В.И. Возбуждение кавитаций в аппаратах типа гидродинамической сирены / В.И. Биглер, В.Н. Лавренчик, В.Ф. Юдаев // Акуст. журн. – 1978. – Т. 24, № 1. – С. 34–39.
12. Юдаев, В.Ф. Гидромеханические процессы в роторных аппаратах с модуляцией проходного сечения потока обрабатываемой среды / В.Ф. Юдаев // Теорет. основы хим. технологии. – 1994. – Т. 28, № 6. – С. 581–590.
13. Свидетельство № 2009614517 о регистрации программы для ЭВМ. Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа / Промтов М.А., Сундуков М.С. (РФ) ; опубл. 24.08.2009.
14. Свидетельство № 2010612236 о регистрации программы для ЭВМ. Программа расчета полей скоростей и давлений в каналах роторного импульсного аппарата / Промтов М.А., Сундуков М.С., Степанов А.Ю. (РФ) ; опубл. 25.03.2010.

---

## Computer System Calculation of Rotor Impulse Machine

M.A. Promtov, A.Yu. Stepanov

Department "Technospheric Security", TSTU; mahp@tambov.ru

**Key words and phrases:** impulse pressure; computer system; power; calculation; consumption; rotary pulse machine; cavitation number.

**Abstract:** The paper presents an algorithm and computer system for calculating the rotary pulse machine of radial type. The criteria for the calculation are the values of the amplitude of pressure impulse, power consumption, the consumption of the processed liquid and the number of pulsed acoustic cavitation.

## Computersystem der Berechnung des Rotorimpulsapparates

**Zusammenfassung:** Es sind den Algorithmus und das Computersystem der Berechnung des Rotorimpulsapparates des Radialtypus erarbeitet. Als Kriterien der Berechnung sind die Werte der Amplitude des Druckimpulses, der verbrauchenden Kapazität, des Verbrauches der bearbeitenden Flüssigkeit und der Zahl der impulsartigen akustischen Kavitation angenommen.

---

## Système informatique du calcul de l'appareil d'impulsion rotor

**Résumé:** Est réalisé l'algorithme et le système informatique du calcul de l'appareil d'impulsion rotor du type radial. En qualité de critère du calcul sont admises les valeurs de l'amplitude de l'impulsion de la pression, de la puissance consommée, du débit du liquide traité et du nombre de la cavitation acoustique d'impulsion.

---

**Авторы:** *Промтов Максим Александрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техносферная безопасность»; *Степанов Андрей Юрьевич* – аспирант кафедры «Техносферная безопасность», ГОУ ВПО «ТГТУ».

**Рецензент:** *Ткачев Алексей Григорьевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техника и технологии производства нанопродуктов», ГОУ ВПО «ТГТУ».

---