

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ЖИДКОСТИ В РОТОРНОМ ИМПУЛЬСНОМ АППАРАТЕ

М.А. Промтов, А.Ю. Степанов

ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Рецензент д-р техн. наук, профессор Н.Ц. Гапанова

Ключевые слова и фразы: давление; расчет; роторный импульсный аппарат; скорость; уравнение Бернулли.

Аннотация: Описаны два метода расчета параметров потока жидкости через каналы ротора и статора роторного импульсного аппарата: численный метод расчета нестационарного уравнения Бернулли и метод расчета на основе программного продукта ANSYS. На основании анализа расчетных и экспериментальных данных выявлено, что наиболее точно согласуются с экспериментальными данными зависимости давления от времени, полученные при численном решении нестационарного уравнения Бернулли.

Обозначения: a_c – ширина каналов статора, м; B – коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий потери напора, линейно зависящие от скорости потока; d_3 – эквивалентный диаметр канала статора, м; h_c – высота каналов статора, м; l_p, l_c – длина канала ротора, статора соответственно, м; l – эквивалентная длина гидравлического участка, м; $P_{и}$ – импульсное давление, Па; P_c – давление в канале статора, рабочей камере, Па; P_p – давление на входе в полость ротора, Па; ΔP – перепад давления между полостью ротора и камерой статора, Па; S – площадь поперечного сечения канала статора, м²; T, t – время, с; V – скорость потока жидкости в канале статора, м/с; β – коэффициент количества движения; δ – величина зазора между ротором и статором, м; ξ – коэффициент гидравлического сопротивления; λ – коэффициент сопротивления трению; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости, м/с²; ρ – плотность жидкости, кг/м³.

Промтов Максим Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность», декан факультета «Международное образование», e-mail: mahp@tambov.ru; Степанов Андрей Юрьевич – аспирант, ассистент кафедры «Техносферная безопасность», ТамбГТУ, г. Тамбов.

Роторные импульсные аппараты (РИА) являются эффективным оборудованием 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 [4].

При вращении ротора, имеющего форму цилиндра, его каналы периодически совмещаются с каналами статора. Преимуществом конструкции ротора радиального типа является создание центробежных сил, действующих на жидкость внутри полости ротора. Каналы для прохода жидкости находятся в цилиндрических стенках ротора и статора, течение потока жидкости через каналы проходит в радиальном направлении.

В период времени, когда каналы ротора перекрыты стенкой статора, в полости ротора давление возрастает, а при совмещении канала ротора с каналом статора давление за короткий промежуток времени сбрасывается, и в результате этого в канал статора распространяется импульс давления. При распространении в канале статора импульса избыточного давления, вслед за ним возникает кратковременный импульс пониженного давления, так как совмещение каналов ротора и статора завершилось, и подача жидкости в канал статора происходит только за счет «транзитного» течения из радиального зазора между ротором и статором.

Объем жидкости, вошедший в канал статора, стремится к выходу из канала, и инерционные силы создают растягивающие напряжения в жидкости, что вызывает кавитацию. Основное воздействие на обрабатываемую среду осуществляется в канале статора за счет гидромеханических и гидроакустических факторов: пульсаций давления и скорости потока, кавитационных эффектов, развитой турбулентности.

Расчет закономерностей изменения скорости и давления в канале статора необходим для определения гидродинамических, энергетических и технологических характеристик аппарата. Точный метод расчета скорости и давления основывается на решении уравнений Навье–Стокса, менее точный – с использованием уравнений, являющихся их следствием, например, уравнения Бернулли [2, 5, 6].

Наглядная математическая модель, достаточно полно отражающая основные закономерности нестационарных гидромеханических процессов в каналах ротора и статора РИА, базируется на уравнении Бернулли, записанном в нестационарной форме

$$\beta l \frac{dV}{dt} + \frac{V^2}{2d_3} \left(\lambda(t)l + \xi(t)d_3 + \frac{B(t)v}{V} \right) = \frac{\Delta P}{\rho}, \quad (1)$$

где $l = l_c + \delta + l_p$; $\Delta P = P_p - P_c$.

Уравнение (1) решали методом Рунге–Кутты четвертого порядка [1]. Получив зависимость $V(t)$, на основе уравнения (1) можно определить ускорение потока жидкости:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{\beta l} \left(\frac{\Delta P}{\rho} - \frac{V^2}{2} \left(\frac{vB(t)}{Vd_3} + \xi(t) \right) \right). \quad (2)$$

Численное решение дифференциального уравнения Бернулли можно производить аналитическими и графическими методами, а также при помощи ЭВМ. Метод, основанный на численном решении нестационарного дифференциального уравнения Бернулли, достаточно полно отражает основные закономерности нестационарных гидромеханических процессов в РИА. Недостатком данного метода является определение значений скорости и ускорения для одной конкретной точки пространства РИА (точка между каналами ротора и статора при $\delta \rightarrow 0$) [5, 6].

Для применения точного метода расчета скорости и давления в каналах ротора и статора рассмотрим уравнение Навье–Стокса для двухмерного случая совместно с уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости:

$$\begin{cases} \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2} \right); \\ \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

здесь V_x, V_y – проекции скорости на оси координат x и y .

Сложность гидромеханических процессов не позволяет использовать уравнение Навье–Стокса для нахождения кинематических и динамических характеристик потока жидкости ($V_x = V_x(x, y, t)$, $V_y = V_y(x, y, t)$, $P = P(x, y, t)$), так как описание нестационарных гидромеханических процессов в РИА связано с использованием нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных с переменными начальными и граничными условиями, многие из которых обычно неизвестны. Особую трудность вызывает то, что одна из границ (поверхность стенки ротора и канала ротора) подвижна. Необходимо применение простых моделей течения жидкости, описывающих с достаточной точностью законы движения потока рабочей среды.

Для решения системы дифференциальных уравнений (3) использовался программный продукт на основе конечно-элементного анализа – ANSYS CFX фирмы ANSYS Inc. ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного анализа, работающая на основе геометрического ядра Parasolid. Модуль ANSYS CFX основан на методе контрольных объемов, дающем высокую точность и использующем вычислительный блок по давлению, что позволяет применять эти продукты для решения широкого круга инженерных задач. Вычислительный блок ANSYS CFX использует сетку конечных элементов (числовые значения в узлах сетки), формирует уравнения для конечных объемов, которые обеспечивают сохранение значений потока, что является необходимым условием для точных решений задач гидрогазодинамики. В ANSYS CFX вычисления базируются на основных уравнениях движения [3].

Используя данные, полученные в результате расчетов скорости и ускорения потока жидкости вышеперечисленными методами при одинаковых геометрических и технологических параметрах, покажем графики зависимости скорости (рис. 1, *a*) и ускорения (рис. 1, *б*) потока жидкости в канале статора от времени.

Разница в результатах расчета скорости и ускорения потока жидкости в канале статора РИА при численном решении уравнения (1) и при решении уравнений (3) программным продуктом ANSYS CFX не превышает 10 % для скорости и 5 % для ускорения.

Уравнение для расчета импульса давления, генерируемого в канал статора, имеет вид [2]

$$P_n(t) = \rho \frac{dV}{dt} \left[\frac{S}{2\pi} \right]^{0,5}, \quad (4)$$

где $S = a_c h_c$, a_c – ширина канала статора, м; h_c – высота канала статора, м.

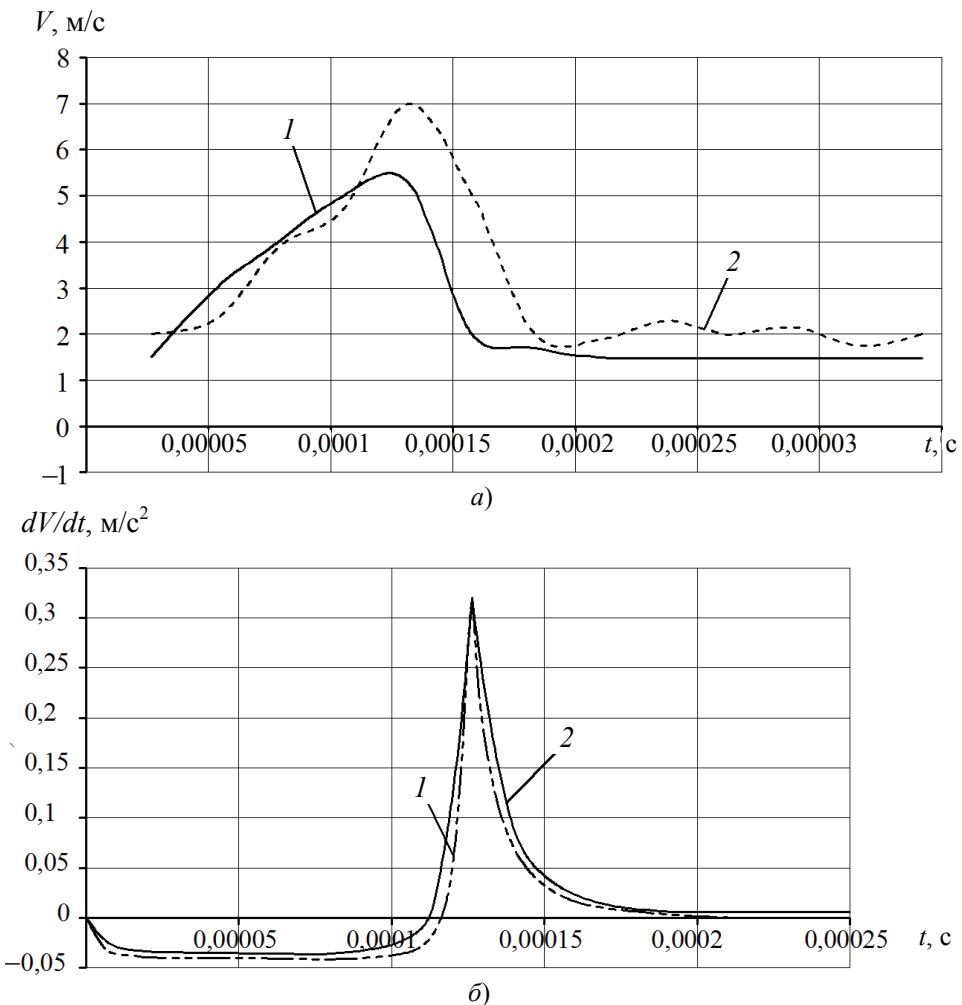


Рис. 1. Графики зависимости скорости (*a*) и ускорения (*б*) потока жидкости, полученные различными методами расчета:

1 – численное решение уравнения (1); 2 – решение уравнений (3) программным продуктом ANSYS CFX

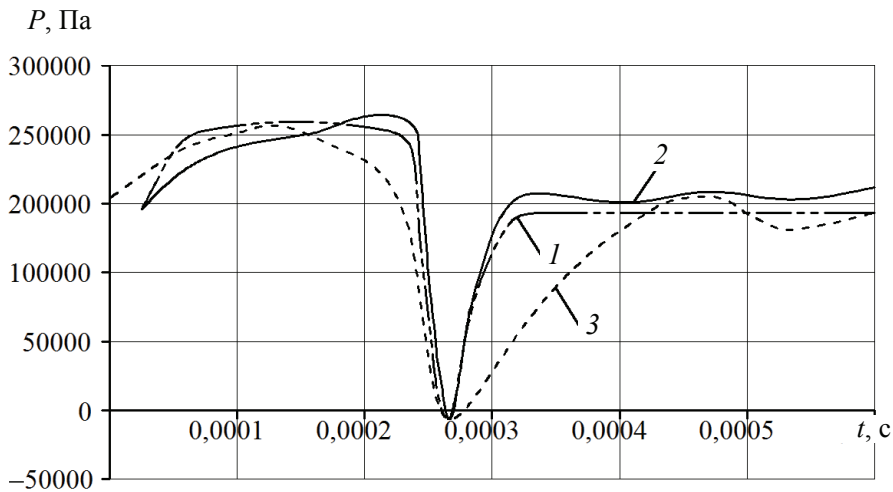


Рис. 2. Графики зависимости давления в потоке жидкости, полученные различными методами расчета:
 1 – численное решение уравнений (2) и (4); 2 – решение уравнения (3) программным продуктом ANSYS CFX; 3 – экспериментальные данные

На рисунке 2 показаны графики зависимости давления в потоке жидкости от времени, полученные на основе уравнения (4).

На основании анализа расчетных и экспериментальных данных выявлено, что наиболее точно согласуются с экспериментальными данными зависимости давления от времени, полученные при численном решении нестационарного уравнения Бернулли.

Список литературы

1. Бахвалов, Н.С. Численные методы : учеб. пособие для вузов / Н.С. Бахвалов, Н.П. Жидков, Г.М. Кобельков. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : БИНОМ. Лаб. знаний, 2003. – 632 с.
2. Зимин, А.И. Прикладная механика прерывистых течений / А.И. Зимин. – М. : Фолиант, 1997. – 308 с.
3. Каплун, А.В. ANSYS в руках инженера : практ. руководство / А.В. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
4. Промтов, М.А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика : монография / М.А. Промтов. – М. : Машиностроение-1, 2001. – 260 с.
5. Промтов, М.А. Расчет основных параметров роторного импульсного аппарата радиального типа / М.А. Промтов // Хим. и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 9. – С. 13–15.
6. Промтов, М.А. Компьютерная система расчета роторного импульсного аппарата / М.А. Промтов, А.Ю. Степанов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 83–89.

Comparative Analysis of Calculation Methods of Fluid Flow Parameters in Rotor Impulse Apparatus

M.A. Promptov, A.Yu. Stepanov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: ANSYS; the Bernoulli equation; calculation; pressure; rotary pulse machine; velocity.

Abstract: The article describes two methods of calculating the fluid flow through the channels of the rotor and the stator of rotary pulse apparatus: a numerical method for calculating the unsteady Bernoulli's equation and the method of calculation based on the ANSYS software. The analysis of the calculated and experimental data has revealed that pressure versus time dependencies obtained by the numerical solution of the unsteady Bernoulli equation most closely agree with the experimental data.

© М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, 2012