

ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ОТ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЧИСЛАМИ КАНАЛОВ РОТОРНО-ИМПУЛЬСНОГО АППАРАТА

П. Ю. КРУПЕНИН, канд. техн. наук, доцент

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,
Горки, Республика Беларусь

Введение. Роторно-импульсные кавитационные аппараты являются эффективным устройством для комплексного воздействия на обрабатываемую среду. Данные устройства применяются для измельчения различных материалов в жидкости, создания высокодисперсных суспензий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов, гомогенизации и обеззараживания жидкостей [1]. Вышеперечисленные свойства роторно-импульсных аппаратов могут быть использованы в сельском хозяйстве для приготовления высокодисперсных кормов и кормовых добавок, пастеризации молочного корма для телят, подготовки субстратов для биогазовых комплексов, производства органических и комплексных удобрений [2, 3].

В результате анализа существующих математических моделей, описывающих движение жидкости в рабочих элементах роторно-импульсного аппарата [4, 5], установлено, что значительная их часть получена с существенными допущениями или же имеет узкоспециализированную направленность. Расхождение между расчетными значениями расхода жидкости через диспергатор и экспериментальными данными может составлять 25–40 % [6]. Из этого следует, что вопрос получения адекватной математической модели для теоретического описания процесса движения жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат остается открытым.

Основная часть. В качестве базовой математической модели движения жидкости в сообщающихся каналах ротора и статора аппарата может быть принято уравнение Бернулли для неустановившегося потока [7]:

$$\frac{p_p + p_\omega}{\rho} + \frac{u_p(\tau)^2}{2} = \frac{p_o}{\rho} + \frac{u_c(\tau)^2}{2} (1 + \zeta(\tau)) + (l_p + l_c + \delta) \frac{du(\tau)}{d\tau}, \quad (1)$$

где p_p – абсолютное давление в полости ротора, Па;

p_o – абсолютное давление в рабочей камере статора, Па;

p_{ω} – прирост давления за счет раскрутки жидкости в каналах ротора, Па;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$u_p(\tau), u_c(\tau)$ – скорость жидкости на входе в канал ротора и на выходе из канала статора, м/с;

$\zeta(\tau)$ – обобщенный коэффициент гидравлического сопротивления каналов ротора и статора;

l_p, l_c – длина каналов ротора и статора, м;

δ – радиальный зазор между ротором и статором, м.

Для решения дифференциального уравнения (1) может использоваться численный метод Рунге – Кутты 4-го порядка [7, 8], в результате чего получают матрицу значений скорости потока жидкости в канале статора $u_{p-к}$.

В целом можно выделить 4 ключевых момента относительного времени τ : $\tau = \tau_1$ – начало цикла, соответствующее моменту начала совмещения канала статора с каналом ротора (состояние канала I статора на рис. 1); $\tau = \tau_2$ – момент времени, когда каналы ротора и статора полностью совмещены; $\tau = \tau_3$ – момент полного перекрытия канала статора (состояние канала III статора); $\tau = \tau_4$ – момент начала совмещения канала статора со следующим каналом ротора (конец цикла). Значения $\tau_1 \dots \tau_4$ могут быть определены по формулам [8]:

$$\tau_1 = 0; \quad \tau_2 = \frac{2 \arcsin(a_c / 2R_2)}{\omega_p}; \quad \tau_3 = \frac{4 \arcsin(a_c / 2R_2)}{\omega_p}; \quad \tau_4 = \frac{2\pi}{z_p \omega_p}, \quad (2)$$

где a_c – ширина канала статора, м;

R_2 – радиус внешней окружности ротора, м;

ω_p – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

z_p – число каналов ротора.

Зная функцию скорости $u(\tau)$ мгновенный расход жидкости $q(\tau)$ составит:

$$q(\tau) = a_c h_c u(\tau), \quad (3)$$

где h_c – высота канала статора, м.

Для получения функции мгновенного расхода $Q(t)$ для роторно-импульсного аппарата в целом рассмотрим несколько каналов статора. При разном числе каналов ротора z_p и статора z_c угловые расстояния между каналами ψ_p и ψ_c также не равны друг другу, а, следовательно, в любой момент абсолютного времени t относительное время цикла τ

для разных каналов статора будет отличаться. Для смежных каналов статора, например, для каналов I и II , расхождение в относительном времени τ составит:

$$\tau_{\Delta} = \frac{\Psi_{\Delta}}{\omega_p} = \frac{\Psi_p - \Psi_c}{\omega_p}, \quad (4)$$

где Ψ_p, Ψ_c – угловое расстояние между смежными каналами на роторе и статоре, рад.

Положительные значения τ_{Δ} говорят о том, что рабочий цикл следующего по направлению вращения ротора канала статора опережает цикл предыдущего канала, отрицательные – отстает от него.

Поскольку движение жидкости по каналу статора осуществляется циклично (относительное время цикла τ увеличивается от $\tau_1 = 0$ до $\tau_4 = \tau_{\Pi}$, по достижении которого переменная τ «сбрасывается» на 0 и цикл повторяется) относительное время τ_I канала I может быть увязано с абсолютным временем t зависимостью

$$\tau_I(t) = |t + \tau_{\Pi}| \bmod \tau_{\Pi}, \quad (5)$$

где τ_{Π} – продолжительность цикла канала статора, $\tau_{\Pi} = \tau_4$, с.

Поскольку относительное время цикла τ канала II отличается на величину τ_{Δ} , то для него выражение примет вид:

$$\tau_{II}(t) = |t + \tau_{\Delta} + \tau_{\Pi}| \bmod \tau_{\Pi}. \quad (6)$$

В общем виде зависимость относительного времени цикла τ для i_c -го канала статора от абсолютного времени t запишется как

$$\tau_{i_c}(t) = |t + \tau_{\Delta}(i_c - 1) + \tau_{\Pi}| \bmod \tau_{\Pi}; \quad i_c \in 0 \dots z_c, \quad (7)$$

где i_c – порядковый номер канала статора;

z_c – число каналов статора.

Зависимость мгновенного расхода жидкости через i_c -й канал статора от абсолютного времени t получим из выражения (3) путем замены аргумента функции $u(\tau)$ с τ на $\tau_{i_c}(t)$:

$$q_{i_c}(t) = a_c h_c u(\tau_{i_c}(t)). \quad (8)$$

Рассмотрим влияние количества каналов ротора z_p и статора z_c на характер пульсаций суммарного расхода жидкости через роторно-импульсный аппарат Q . На рис. 1 представлены графические зависи-

мости расхода Q при различных сочетаниях z_p и z_c . Прочие конструктивно-технологические параметры неизменны и зафиксированы на вышеприведенных в статье уровнях.

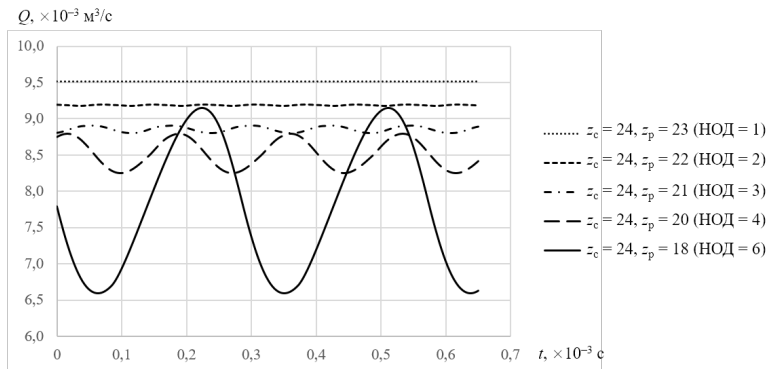


Рис. 1. Зависимость расхода Q от времени t при различных числах каналов статора z_c и ротора z_p

В результате теоретических исследований выявлена закономерность роста значений амплитуды и периода пульсаций расхода Q по мере увеличения наибольшего общего делителя (НОД) чисел каналов ротора z_p и статора z_c . Например при $z_p = 23$ и $z_c = 24$ (НОД = 1) амплитуда пульсаций расхода A_Q составляет менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$ при периоде $T_Q = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. При увеличении НОД чисел z_p и z_c до 6 ($z_p = 18$, $z_c = 24$) амплитуда пульсаций расхода возрастает на 4 порядка до $A_Q = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, а период становится равным $T_Q = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

Также следует отметить влияние НОД чисел z_p и z_c на средний расход \bar{Q} жидкости через роторно-импульсный аппарат. Как видно из графика на рис. 1, увеличение НОД с 1 до 6 понижает средний расход \bar{Q} на 17 % с $9,5 \cdot 10^{-3}$ до $7,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$, что обусловлено как меньшим числом каналов ротора z_p , а следовательно, уменьшением количества их совмещений с каналами статора, так и повышением амплитуды пульсаций Q , увеличивающих инерционное гидравлическое сопротивление проточных частей аппарата.

Заключение. Мгновенный расход жидкости $Q(t)$ через роторно-импульсный аппарат характеризуется периодическими пульсациями, образующимися в результате наложения друг на друга его составляю-

щих – расходов жидкости $q_c(t)$ по отдельным каналам статора. Установлена зависимость амплитуды A_Q и периода T_Q пульсаций расхода Q от наибольшего общего делителя чисел каналов ротора z_p и статора z_c . При $z_p = 23$ и $z_c = 24$ (НОД = 1) амплитуда пульсаций расхода A_Q составляет менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$, а период $T_Q = 3,7 \cdot 10^{-5} \text{ с}$. При увеличении НОД чисел z_p и z_c до 6 ($z_p = 18$, $z_c = 24$) амплитуда пульсаций расхода возрастает на 3 порядка до $A_Q = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; период пульсаций увеличивается до $T_Q = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промтов, М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М. А. Промтов. – Москва: Изд-во «Машиностроение-1», 2004. – 136 с.
2. Червяков, А. В. Диспергирование плошеного зерна кукурузы / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Комбикорма. – 2009. – № 5. – С. 36–37.
3. Кулик, А. М. Обоснование рационального способа производства гуминовых удобрений из торфа / А. М. Кулик, П. Ю. Крупенин // Вестн. БГСХА. – 2023. – № 3. – С. 181–185.
4. Карепанов, С. К. Реализация математической модели течения рабочей жидкости в каналах ротора и статора гидромеханического диспергатора / С. К. Карепанов, В. П. Ружицкий // Математические методы в механике прерывистых течений. – Санкт-Петербург: Технопанорама, 1999. – С. 19–27.
5. Червяков, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования производительности роторного кавитационного измельчителя-диспергатора кормов / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. БГСХА. – 2010. – № 3. – С. 131–135.
6. Червяков, А. В. Влияние конструктивно-технологических параметров на подачу роторно-импульсного кавитационного диспергатора кормов / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, П. Ю. Крупенин // Вестн. БГСХА. – 2016. – № 1. – С. 102–106.
7. Крупенин, П. Ю. Математическая модель движения кормовой суспензии в каналах роторного импульсного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вестн. Барановичского гос. ун-та. Серия: Технические науки. – 2018. – Вып. 6. – С. 96–103.
8. Крупенин, П. Ю. Теоретические исследования движения жидкости в каналах роторно-импульсного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вестн. БГСХА. – 2023. – № 1. – С. 137–142.

Аннотация. Статья посвящена теоретическому исследованию рабочего процесса роторно-импульсного аппарата. Выявлена закономерность роста значений амплитуды и периода пульсаций общего расхода жидкости через аппарат по мере увеличения наибольшего общего делителя чисел его каналов ротора и статора.

Ключевые слова: роторно-импульсный аппарат, кавитация, уравнение Бернулли, метод Рунге – Кутты, теоретические исследования, Mathcad.