

УДК 631.363.5

**П. Ю. Крупенин<sup>1</sup>**, кандидат технических наук, доцент,**А. В. Китун<sup>2</sup>**, доктор технических наук, профессор<sup>1</sup> Учреждение образования «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия», ул. Мичурина, 5, 213407 Горки, Республика Беларусь, pavel@krupenin.com<sup>2</sup> Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», пр-т Независимости, 99, 220023 Минск, Республика Беларусь, ktmg@batu.edu.by

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ КОЛЕБАНИЙ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ РОТОРНО-ИМПУЛЬСНЫЙ КАВИТАЦИОННЫЙ АППАРАТ

Роторно-импульсные аппараты применяются для измельчения различных материалов в жидкости, приготовления высокодисперсных суспензий и эмульсий, интенсификации массообменных процессов, гомогенизации и обеззараживания жидкостей. Существует несколько способов расчета параметров роторно-импульсного аппарата, однако для реализации любого из них необходимо знать закономерности движения жидкости как в каналах ротора и статора, так и за пределами аппарата.

Статья посвящена теоретическому исследованию процесса движения жидкости через роторно-импульсный аппарат. В результате исследований выявлена закономерность роста значений амплитуды и периода пульсаций общего расхода жидкости через аппарат по мере увеличения наибольшего общего делителя чисел каналов ротора и статора.

Предложена синусоидальная функция  $Q_{\sin}(t)$  для описания изменений мгновенного расхода жидкости  $Q$  через роторно-импульсный аппарат. Коэффициентами функции  $Q_{\sin}(t)$  являются средний расход жидкости через аппарат, амплитуда и период пульсаций. Методами математической статистики установлено, что функция  $Q_{\sin}(t)$  имеет сильную корреляционную связь (коэффициент  $r \geq 0,85$ ) со значениями мгновенного расхода  $Q$  и может быть использована для определения параметров потока обрабатываемого материала на входе и выходе из роторно-импульсного аппарата.

**Ключевые слова:** роторно-импульсный аппарат; кавитация; уравнение Бернулли; метод Рунге—Кутты; теоретические исследования; Mathcad.

Рис. 4. Библиогр.: 13 назв.

**P. Y. Krupenin<sup>1</sup>**, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,**A. V. Kitun<sup>2</sup>**, DSc in Technical Sciences, Professor<sup>1</sup>Institution of Education “Belarusian State Agricultural Academy”,

5 Michurina Str., 213407 Horki, the Republic of Belarus, pavel@krupenin.com

<sup>2</sup>Institution of Education “Belarusian State Agrarian Technical University”,

99 Nezalezhnosti Ave., 220023 Minsk, the Republic of Belarus, ktmg@batu.edu.by

## MATHEMATICAL DESCRIPTION IN THE FLUID FLOW FLUCTUATIONS THROUGH A ROTARY-PULSE CAVITATION APPARATUS

Rotary pulse devices are used for grinding various materials in liquids, preparing highly dispersed suspensions and emulsions, intensifying mass transfer processes, homogenizing and disinfecting liquids. There are several ways to calculate the rotary-impulse apparatus parameters, however, to implement any of them, it is necessary to know the fluid movement patterns both in the rotor and stator channels, and outside the apparatus.

The article is devoted to theoretical studies of fluid movement through a rotary-impulse apparatus. As a result of the research, a growth pattern in the amplitude and period of pulsations of the total fluid flow through the apparatus has been revealed as the greatest common divisor of the numbers of its rotor and stator channels increases.

A sinusoidal function  $Q_{\sin}(t)$  to describe the pulsation of liquid flow  $Q$  through a rotary-pulse apparatus is proposed. The coefficients of the function  $Q_{\sin}(t)$  are the average fluid flow through the apparatus, the amplitude and period of the pulsations. Using mathematical statistics methods, it has been established that the function  $Q_{\sin}(t)$  has a strong correlation (coefficient  $r \geq 0.85$ ) with the instantaneous flow rate values  $Q$  and can be used to determine the processed material flow parameters at the inlet and outlet of the rotary-impulse apparatus.

**Key words:** rotary-impulse apparatus; cavitation; Bernoulli equation; Runge—Kutta method; theoretical research; Mathcad.

Fig. 4. Ref.: 13 titles.

**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].

Импульсный, сопровождаемый кавитационными эффектами характер движения жидкой среды в сочетании с режуще-стирающим воздействием рабочих элементов роторно-импульсного аппарата на частицы твердой фазы суспензии обеспечивает комплексную обработку материала, включающую в себя факторы механического, гидроимпульсного и кавитационного воздействий. Существует несколько методик расчета параметров роторно-импульсного аппарата для интенсификации одного или нескольких из перечисленных воздействий на обрабатываемый материал [4—6], однако для применения любой из них необходимо знать закономерности движения жидкости или суспензии по каналам ротора и статора.

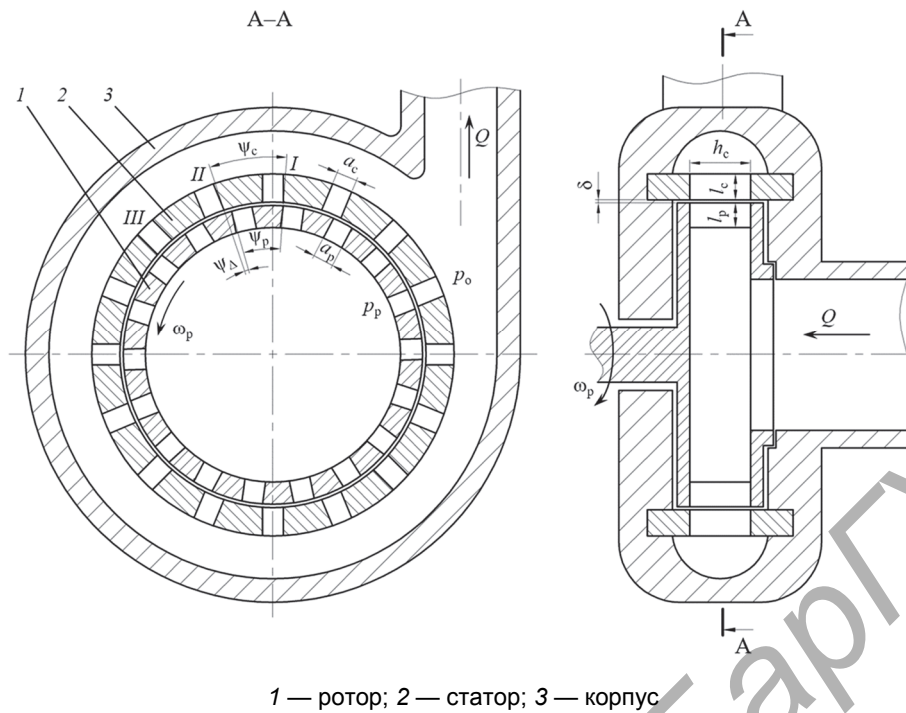
В результате анализа существующих математических моделей, описывающих движение жидкости в рабочих элементах роторно-импульсного аппарата [7; 8], установлено, что значительная их часть получена с существенными допущениями или же имеет узкоспециализированную направленность. Расхождение между расчетными значениями расхода жидкости через диспергатор и экспериментальными данными может составлять 25...40 % [9]. Из этого следует, что вопрос получения адекватной математической модели для теоретического описания процесса движения жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат остается открытым.

**Методология и методы исследования.** Принцип работы роторно-импульсного кавитационного аппарата (рисунок 1) заключается в следующем. Обрабатываемая жидкость (суспензия, эмульсия) под давлением  $p_p$  подается во входной патрубке и заполняет полость ротора 1. Вращение ротора с угловой скоростью  $\omega_r$  обеспечивает периодическое соединение и разъединение его каналов с каналами статора 2, в результате чего в каналах создается прерывистое движение жидкости, сопровождаемое пульсациями скорости, расхода и давления.

В качестве базовой математической модели движения жидкости в сообщающихся каналах ротора и статора аппарата может быть принято уравнение Бернулли для неустановившегося потока [10]:

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

- где  $p_p$  — абсолютное давление в полости ротора, Па;  
 $p_\omega$  — прирост давления за счет раскрутки жидкости в каналах ротора, Па;  
 $u_p(\tau), u_c(\tau)$  — скорость жидкости на входе в канал ротора и на выходе из канала статора соответственно, м / с;  
 $\rho$  — плотность жидкости, кг / м<sup>3</sup>;  
 $p_o$  — абсолютное давление в рабочей камере статора, Па;  
 $\zeta(\tau)$  — обобщенный коэффициент гидравлического сопротивления каналов ротора и статора;  
 $l_p, l_c$  — длина каналов ротора и статора, м;  
 $\delta$  — радиальный зазор между ротором и статором, м.



1 — ротор; 2 — статор; 3 — корпус

Рисунок 1. — Конструктивно-технологическая схема роторно-импульсного аппарата

**Результаты исследования и их обсуждение.** Для решения дифференциального уравнения (1) может использоваться численный метод Рунге—Кутты 4-го порядка [10; 11], в результате чего получают матрицу значений скорости потока жидкости в канале статора  $u_{p-k}$ . Результат расчета значений скорости  $u_{p-k}$  при таких конструктивно-технологических параметрах роторно-импульсного аппарата, как  $l_p = 17,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $l_c = 16,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $\delta = 0,15 \cdot 10^{-3}$  м,  $p_p = 0,27 \cdot 10^6$  Па,  $p_0 = 0,1 \cdot 10^6$  Па,  $p_\omega = 0,12 \cdot 10^6$  Па,  $\rho = 1\,000$  кг / м<sup>3</sup>, представлен на рисунке 2.

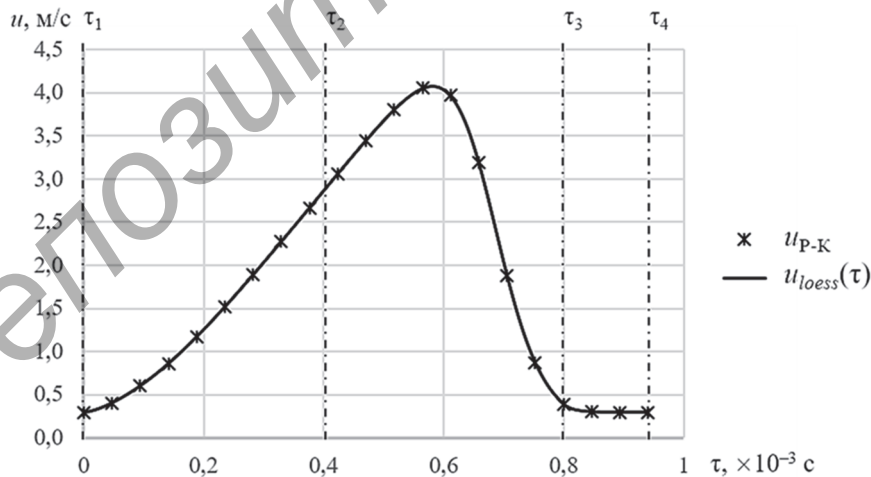


Рисунок 2. — Зависимость скорости  $u$  от относительного времени  $\tau$

На графике (см. рисунок 2) можно выделить четыре ключевых момента относительного времени  $\tau$ :  $\tau = \tau_1$  — начало цикла, соответствующее моменту начала совмещения канала статора с каналом ротора (состояние канала I статора на рисунке 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 следующим формулам [11]:

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

где  $a_c$  — ширина канала статора, м;

$R_2$  — радиус внешней окружности ротора, м;

$\omega_p$  — угловая скорость вращения ротора, рад / с;

$z_p$  — число каналов ротора.

За функцию скорости  $u(t)$  может быть принято уравнение регрессии, достаточно точно аппроксимирующее значения  $u_{p-k}$ , полученные в результате численного решения уравнения (1). Точную (коэффициент корреляции  $r > 0,9999$ ) аппроксимацию значений скорости  $u_{p-k}$  обеспечивает функция  $u_{loess}(\tau)$  в виде нескольких отрезков аппроксимирующих полиномов 2-й степени [12]. Для расчета коэффициентов аппроксимирующей функции  $u_{loess}(\tau)$  применяется система компьютерной алгебры Mathcad с использованием в ней команды  $loess(\tau, u_{p-k}, span)$ , где  $span$  — условная длина отрезка аппроксимирующего полинома 2-й степени [13]. Из графика на рисунке 2 видно, что при  $span = 0,2$  функция  $u_{loess}(\tau)$  весьма точно описывает набор значений скорости  $u_{p-k}$ , в связи с чем регрессионная модель  $u_{loess}(\tau)$  с некоторым приближением может быть принята в качестве истинной функции скорости жидкости в канале статора  $u(\tau)$ .

Зная функцию скорости  $u(\tau)$ , мгновенный расход жидкости

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

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  $\psi_p$  и  $\psi_c$  (см. рисунок 1) также не равны друг другу, следовательно, в любой момент абсолютного времени  $t$  относительное время цикла  $\tau$  для разных каналов статора будет отличаться. Для смежных каналов статора, например, для каналов I и II, расхождение в относительном времени

$$\tau_{\Delta} = \frac{\psi_{\Delta}}{\omega_p} = \frac{\psi_p - \psi_c}{\omega_p},$$

где  $\psi_p, \psi_c$  — угловое расстояние между смежными каналами на роторе и статоре соответственно, рад.

Положительные значения  $\tau_{\Delta}$  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  $\tau$  увеличивается от  $\tau_1 = 0$  до  $\tau_4 = \tau_{ц}$ , по достижении которого переменная  $\tau$  «сбрасывается» на 0 и цикл повторяется) относительное время  $\tau_I$  канала I может быть увязано с абсолютным временем  $t$  зависимостью

$$\tau_I(t) = |t + \tau_{ц}| \bmod \tau_{ц}, \quad (2)$$

где  $\tau_{ц}$  — продолжительность цикла канала статора,  $\tau_{ц} = \tau_4$ , с.

Поскольку относительное время цикла  $\tau$  канала II отличается на величину  $\tau_{\Delta}$ , то для него выражение (2) примет следующий вид:

$$\tau_{II}(t) = |t + \tau_{\Delta} + \tau_{ц}| \bmod \tau_{ц}.$$

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

$$\tau_{i_c}(t) = |t + \tau_{\Delta}(i_c - 1) + \tau_{\Pi}| \bmod \tau_{\Pi}; \quad i_c \in 0 \dots z_c, \quad (3)$$

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  $\tau$  на  $\tau_{i_c}(t)$ :

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

Графики расходов  $q_I$ ,  $q_{II}$  и  $q_{III}$  для  $I$ ,  $II$  и  $III$  каналов статора, полученные при  $h_c = 0,025$  м,  $z_p = 22$ ,  $z_c = 24$ , представлены на рисунке 3. Из рисунка видно, что функция  $q_{i_c}(t)$ , описывающая расход жидкости через отдельные каналы статора, является периодической с периодом, равным  $\tau_{\Pi}$ , причем фазы  $II$  и  $III$  каналов сдвинуты по времени относительно фазы  $I$  канала на величину  $\tau_{\Delta}$  и  $2\tau_{\Delta}$  соответственно.

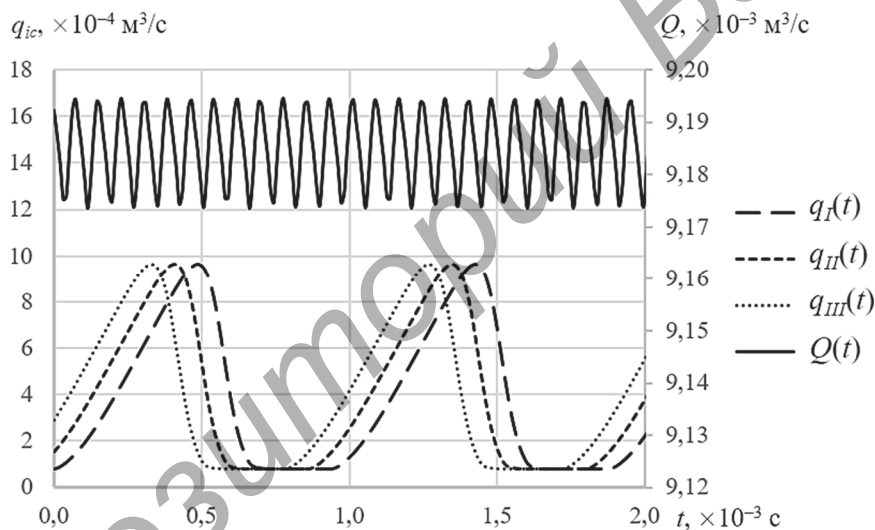


Рисунок 3. — Зависимость расходов жидкости через отдельные каналы  $q$  и аппарат  $Q$  от времени  $t$

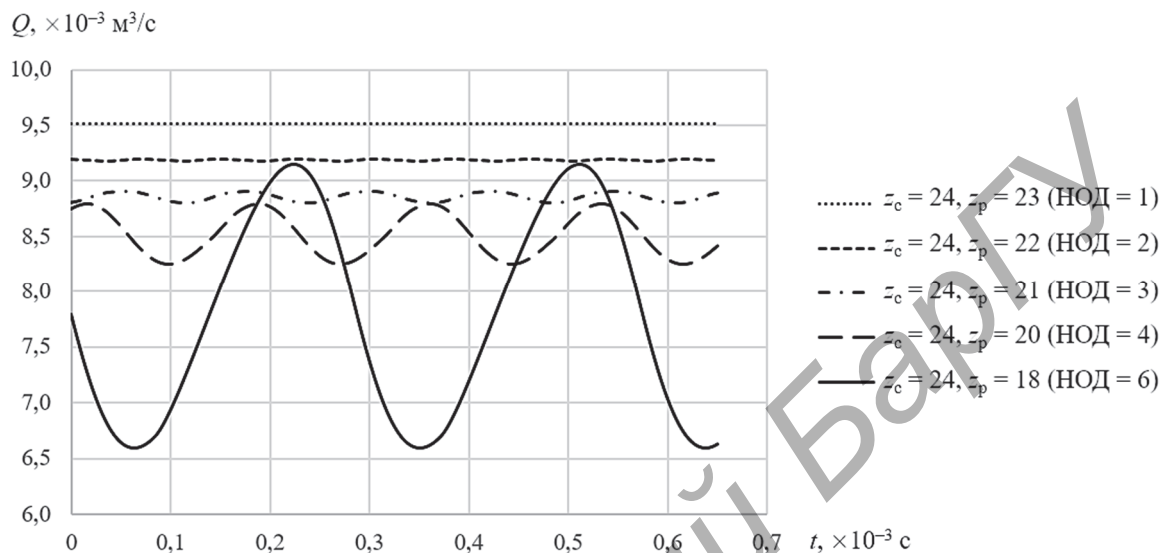
Мгновенный расход жидкости через роторно-импульсный аппарат  $Q$  определяется суммированием расходов  $q_{i_c}$  всех его каналов статора:

$$Q(t) = \sum_{i_c=1}^{z_c} q_{i_c}(t). \quad (4)$$

Анализируя представленный на рисунке 3 график функции расхода жидкости через роторно-импульсный аппарат  $Q(t)$ , можно отметить, что суммарный расход жидкости также характеризуется периодическими пульсациями, образующимися в результате наложения друг на друга его составляющих  $q_{i_c}(t)$ . Для вышеприведенных значений конструктивно-технологических параметров роторно-импульсного аппарата размах пульсаций расхода  $Q(t)$

сравнительно невелик и составляет порядка  $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$ . Период пульсаций расхода  $Q$  в 12 раз короче периода пульсаций его составляющих  $q_i(t)$ .

Рассмотрим влияние количества каналов ротора  $z_p$  и статора  $z_c$  на характер пульсаций суммарного расхода жидкости через роторно-импульсный аппарат  $Q$ . На рисунке 4 представлены графические зависимости расхода  $Q$  при различных сочетаниях  $z_p$  и  $z_c$ . Прочие конструктивно-технологические параметры неизменны и зафиксированы на вышеприведенных в статье уровнях.



**Рисунок 4. — 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 (далее — 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 четыре порядка до  $A_Q = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , а период  $T_Q = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ .

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 рисунке 4, 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.

В целом снижение среднего расхода  $\bar{Q}$  по мере увеличения НОД чисел  $z_p$  и  $z_c$  может иметь как отрицательный, так и положительный эффект. С одной стороны, снижение пропускной способности роторно-импульсного аппарата уменьшает его производительность и, вероятно, повышает затраты энергии на обработку материала; с другой — создание масштабных, с амплитудой более 15 % от среднего расхода  $\bar{Q}$ , пульсаций скорости и давления жидкости не только в каналах ротора и статора аппарата, но и в подводящем и отводящем трубопроводах может стать дополнительным фактором интенсификации процессов диспергирования и эмульгирования, а также послужить отправным пунктом в исследованиях резонансных процессов. Таким образом, изучение закономерностей изменения параметров пульсаций расхода жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат представляет научный и практический интерес.

На основании анализа изменений периода  $T_Q$  в зависимости от различных сочетаний чисел каналов ротора  $z_p$  и статора  $z_c$  получена формула, позволяющая определять значение периода пульсаций общего расхода  $Q$  жидкости через роторно-импульсный аппарат:

$$T_Q = \frac{\tau_{\text{цНОД}}(z_p, z_c)}{z_c},$$

где  $\text{НОД}(z_p, z_c)$  — НОД чисел каналов ротора  $z_p$  и статора  $z_c$ .

Амплитуда  $A_Q$  пульсаций расхода роторно-импульсного аппарата представляет собой величину максимального отклонения функции мгновенного расхода  $Q(t)$  от среднего значения  $\bar{Q}$ , которое может быть определено отношением объема жидкости  $V_{T_p}$ , прошедшего через аппарат за один оборот ротора, к периоду вращения ротора  $T_p$ :

$$\bar{Q} = \frac{V_{T_p}}{T_p}.$$

Значение объема  $V_{T_p}$  может быть получено интегрированием функции  $Q(t)$  в интервале времени  $t$  от 0 до  $T_p$ :

$$V_{T_p} = \int_0^{T_p} Q(t) dt.$$

Анализируя представленные на рисунке 4 графики, следует отметить, что мгновенный расход жидкости через роторно-импульсный аппарат представляет собой периодическую синусоидальную функцию, которая с некоторыми допущениями может быть записана в виде

$$Q_{\text{sin}}(t) = \bar{Q} + A_Q \sin \left[ \frac{2\pi}{T_Q} (t + t_0) \right], \quad (5)$$

где  $t_0$  — поправка ко времени  $t$ , с, обеспечивающая необходимый фазовый сдвиг функции.

Для определения численного значения поправки  $t_0$  рассмотрим функцию  $Q(t)$  в точках экстремума. Из формулы (5) следует, что для моментов времени, когда мгновенный расход  $Q$  принимает максимальные значения, должно выполняться условие

$$\sin \left[ \frac{2\pi}{T_Q} (t_{\text{max}} + t_0) \right] = 1, \quad (6)$$

где  $t_{\text{max}}$  — момент времени, соответствующий максимальному значению расхода  $Q$ , с.

Из уравнения (6) несложно получить искомое значение поправки  $t_0$ :

$$t_0 = \frac{T_Q}{4} - t_{\text{max}}.$$

Адекватность применения синусоидальной функции  $Q_{\text{sin}}(t)$  для описания пульсаций мгновенного расхода  $Q$  жидкости через роторно-импульсный кавитационный аппарат проверена посредством расчета значений коэффициента корреляции Пирсона  $r$ , выполняемого

в системе компьютерной алгебры Mathcad [13]. Согласно расчетам, для представленных на рисунке 4 сочетаний чисел каналов ротора  $z_p$  и статора  $z_c$  значение коэффициента корреляции  $r$  увеличивается с 0,85 при  $\text{НОД}(z_p, z_c) = 1$  до  $r = 0,98 \dots 1,00$  при  $\text{НОД}(z_p, z_c) \geq 4$ . Несколько меньшее по сравнению с другими сочетаниями значение коэффициента  $r$  при  $\text{НОД}(z_p, z_c) = 1$  обусловлено меньшей амплитудой пульсаций и, как следствие, ростом влияния погрешностей численного метода решения дифференциального уравнения (1), а также алгоритма, применяемого для последующей аппроксимации результатов этого решения.

В целом высокие значения коэффициента корреляции  $r$  указывают на сильную связь между синусоидальной функцией  $Q_{\sin}(t)$  и мгновенным расходом  $Q$ , определяемым по формуле (4), что позволяет рекомендовать упрощенное выражение (5) для расчета параметров потока обрабатываемого материала на входе и выходе из роторно-импульсного аппарата. Функция  $Q_{\sin}(t)$  может быть использована для оптимизации конструктивно-технологических параметров последовательно соединенных с роторным кавитационным аппаратом вспомогательных устройств (насосы, мацераторы и др.), а также для описания резонансных процессов в трубопроводном контуре роторно-импульсного аппарата.

**Заключение.** Мгновенный расход жидкости  $Q(t)$  через роторно-импульсный аппарат характеризуется периодическими пульсациями, образующимися в результате наложения друг на друга его составляющих — расходов жидкости  $q_k(t)$  по отдельным каналам статора. Установлена зависимость амплитуды  $A_Q$  и периода  $T_Q$  пульсаций расхода  $Q$  от НОД чисел каналов ротора  $z_p$  и статора  $z_c$ . При  $z_p = 23$  и  $z_c = 24$  ( $\text{НОД} = 1$ ) 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 три порядка до  $A_Q = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , период пульсаций также увеличивается до  $T_Q = 2,9 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ .

Для описания пульсации расхода жидкости  $Q$  через роторно-импульсный аппарат предложена синусоидальная функция  $Q_{\sin}(t)$ . Ее коэффициентами являются средний расход жидкости через аппарат  $\bar{Q}$ , амплитуда  $A_Q$  и период  $T_Q$  пульсаций. Методами математической статистики установлено, что функция  $Q_{\sin}(t)$  имеет сильную корреляционную связь (коэффициент  $r \geq 0,85$ ) со значениями мгновенного расхода  $Q$  и может быть использована для определения параметров потока обрабатываемого материала на входе и выходе из роторно-импульсного аппарата.

#### Список цитированных источников

1. Промтов, М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М. А. Промтов. — М. : Машиностроение-1, 2004. — 136 с.
2. Червяков, А. В. Диспергирование плющеного 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. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2023. — № 3. — С. 181—185.
4. Промтов, М. А. Пульсационные аппараты роторного типа: теория и практика / М. А. Промтов. — М. : Машиностроение-1, 2001. — 247 с.
5. Шаршунов, В. А. Основы расчета кавитационного роторного диспергатора-измельчителя / В. А. Шаршунов, А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Могилев. гос. ун-та продовольствия. — 2010. — № 1. — С. 80—87.
6. Червяков, А. В. Оптимизация параметров роторно-импульсного кавитационного аппарата для интенсификации диспергирования кормовых смесей / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2014. — № 2. — С. 194—198.
7. 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 : межвуз. сб. науч. ст. — СПб. : Технопанорама, 1999. — С. 19—27.
8. Червяков, А. В. Теоретические и экспериментальные исследования производительности роторного кавитационного измельчителя-диспергатора кормов / А. В. Червяков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2010. — № 3. — С. 131—135.

9. Червяков, А. В. Влияние конструктивно-технологических параметров на подачу роторно-импульсного кавитационного диспергатора кормов / А. В. Червяков, С. В. Курзенков, П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2016. — № 1. — С. 102—106.

10. Крупенин, П. Ю. Математическая модель движения кормовой суспензии в каналах роторного импульсного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вестн. БарГУ. Сер. «Технические науки». — 2018. — Вып. 6. — С. 96—103.

11. Крупенин, П. Ю. Теоретические исследования движения жидкости в каналах роторно-импульсного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вестн. Белорус. гос. с.-х. акад. — 2023. — № 1. — С. 137—142.

12. Cleveland, W. S. Smoothing by local regression: Principles and methods / W. S. Cleveland, C. Loader // Statistical Theory and Computational Aspects of Smoothing : Proceedings of the COMPSTAT '94 Satellite Meeting held in Semmering, Austria, 27—28 August 1994. — Physica-Verlag HD, 1996. — С. 10—49. DOI: org/10.1007/978-3-642-48425-4

13. Новиковский, Е. А. Работа в системе MathCAD : учеб. пособие / Е. А. Новиковский. — Барнаул : Тип. АлтГУ, 2013. — 114 с.

Поступила в редакцию 28.03.2024.

Репозиторий БарГУ