

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПУЛЬСАЦИЙ РАСХОДА ОБРАБАТЫВАЕМОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ ЧЕРЕЗ КАВИТАЦИОННЫЙ АППАРАТ РОТОРНОГО ТИПА

Введение. Роторно-импульсные аппараты являются эффективным устройством для комплексного воздействия на обрабатываемую среду. Данные устройства применяются для измельчения различных материалов в жидкости, приготовления 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 комплексе с режуще-стирающим воздействием рабочих элементов роторно-импульсного аппарата на частицы твердой фазы суспензии, обеспечивают 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, однако для применения любой из них необходимо знать закономерности движения жидкости или суспензии по каналам ротора и статора [4].

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

Движение жидкости в сообщающихся каналах ротора и статора аппарата математически может быть описано уравнением Бернулли для неустановившегося потока [6]:

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

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.

В выражении (1) присутствует параметр $\zeta(\tau)$ — обобщенный коэффициент гидравлического сопротивления системы «канал ротора — радиальный зазор — канал статора»:

$$\zeta(\tau) = \begin{cases} 1,5 + \zeta_{\text{пер}} \cdot e^{-9,6 \left(1 - \frac{2 \arcsin(a_c/2R_2) - \omega_p \tau}{2 \arcsin(a_c/2R_2)} \right)}; & \tau_1 \leq \tau < \tau_3; \\ \zeta_{\text{пер}}; & \tau_3 \leq \tau < \tau_4. \end{cases} \quad (2)$$

где $\zeta_{\text{пер}}$ — коэффициент гидравлического сопротивления несообщающихся каналов аппарата [6];

v_p — окружная скорость ротора, м/с;

τ — относительное время (временная метка) рабочего цикла канала статора, с.

В рабочем цикле канала статора можно выделить 4 ключевых момента относительного времени τ : $\tau = \tau_1$ — момент начала открытия канала статора (начало цикла); $\tau = \tau_2$ — момент времени, когда каналы ротора и статора полностью совмещены; $\tau = \tau_3$ — момент полного перекрытия канала статора; $\tau = \tau_4$ — момент начала совмещения канала статора со следующим каналом ротора (конец цикла).

$$\tau_1 = 0; \quad \tau_2 = \frac{2 \arcsin(a_c / 2R_2)}{\omega_p}; \quad \tau_3 = \frac{4 \arcsin(a_c / 2R_2)}{\omega_p}; \quad \tau_4 = \frac{2\pi R_2}{z_p v_p} = \frac{2\pi}{z_p \omega_p}, \quad (3)$$

где ω_p — угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Для прямых (с постоянным поперечным сечением) каналов и при равенстве соответствующих размеров сечения каналов ротора и статора ($a_p = a_c$, $h_p = h_c$), уравнение (1) запишется в виде

$$\frac{du(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{l_p + l_c + \delta} \left(\frac{p_p + p_\omega - p_o}{\rho} - \frac{u(\tau)^2}{2} \zeta(\tau) \right). \quad (4)$$

Поскольку дифференциальное уравнение (4) не может быть решено аналитически, расчет значений скорости u при времени $\tau \in \tau_1 \dots \tau_4$ осуществляли численным методом Рунге—Кутты 4-го порядка [7]. Результаты расчетов значений скорости $u_{p-к}$ для $z_p = 22$, $l_p = 17,5 \cdot 10^{-3}$ м, $l_c = 16,5 \cdot 10^{-3}$ м, $a_p = a_c = 0,01$ м, $\delta = 0,15 \cdot 10^{-3}$ м, $p_p = 0,27 \cdot 10^6$ Па, $p_o = 0,1 \cdot 10^6$ Па, $\rho = 1000$ кг/м³, $\omega_p = 303,7$ рад/с, $R_2 = 82,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\zeta_{пер} = 6,5 \cdot 10^3$ представлены на рисунке 1.

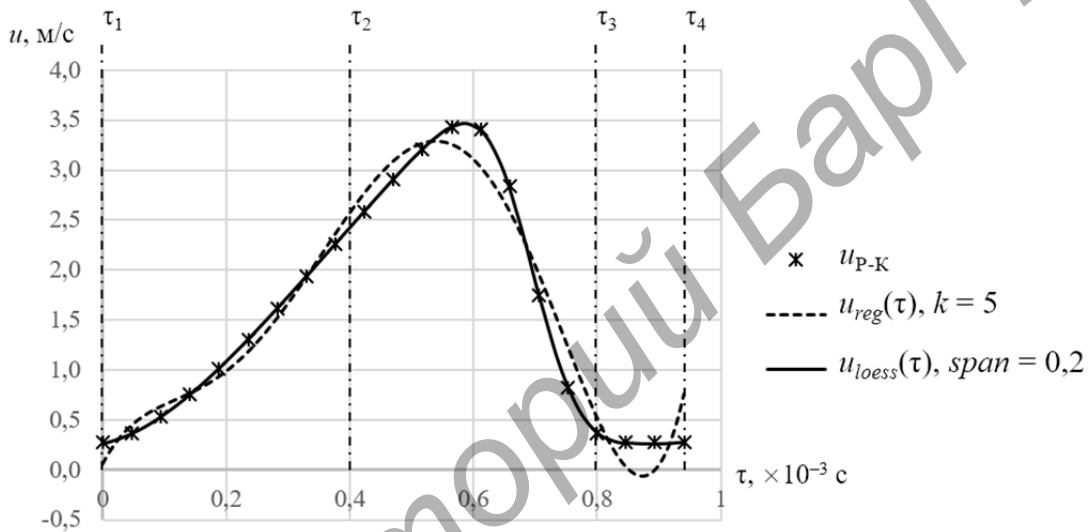


Рисунок 1 — Зависимость скорости u от относительного времени τ

За функцию скорости $u(t)$ может быть принято уравнение регрессии, достаточно точно аппроксимирующее значения $u_{p-к}$, полученные в результате численного решения уравнения (4). Аппроксимация данных полиномом $u_{reg}(\tau)$ со степенью $k \geq 5$ обеспечивает достаточно высокое значение коэффициента корреляции ($r > 0,97$), однако, как видно из рис. 1, функция $u_{reg}(\tau)$ недостаточно корректно описывает значения $u_{p-к}$ в фазе, когда каналы ротора и статора не сообщаются ($\tau \in \tau_3 \dots \tau_4$), допуская, в том числе, противоречащие физическому смыслу отрицательные значения скорости жидкости в каналах аппарата.

Более точную (коэффициент корреляции $r > 0,9999$) аппроксимацию значений скорости $u_{p-к}$ можно обеспечить функцией $u_{loess}(\tau)$ из нескольких отрезков аппроксимирующих полиномов 2-й степени [8]. Коэффициенты аппроксимирующей функции $u_{loess}(\tau)$ могут быть рассчитаны в системе компьютерной алгебры Mathcad с использованием команды $loess(\tau, u_{p-к}, span)$, где $span$ — условная длина отрезка аппроксимирующего полинома 2-й степени [7]. Из графика на рис. 1 видно, что при $span = 0,2$ функция $u_{loess}(\tau)$ весьма точно описывает набор значений скорости $u_{p-к}$, в связи с чем регрессионная модель $u_{loess}(\tau)$ может быть принята в качестве функции скорости $u(\tau)$.

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

$$q(\tau) = a_c h_c u(\tau), \quad (5)$$

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, следовательно, в любой момент абсолютного времени t относительное время цикла τ для разных каналов статора будет отличаться. Для смежных каналов статора, обозначим их числами I и II, расхождение в относительном времени τ составит:

$$\tau_{\Delta} = \frac{\Psi_{\Delta}}{\omega_p} = \frac{\Psi_c - \Psi_p}{\omega_p}, \quad (6)$$

где Ψ_c, Ψ_p — угловое расстояние (шаг) между смежными каналами на статоре и роторе, 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 $\tau_4 = \tau_{ц}$, после чего «сбрасывается» на 0 и цикл повторяется) относительное время τ_i канала I может быть увязано с абсолютным временем t зависимостью

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

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

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 (5) путем замены аргумента функции $u(\tau)$ с τ на $\tau_{i_c}(t)$:

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

Графики расхода жидкости через I, II и III -й каналы статора, полученные при $h_c = 0,025$ м и $z_c = 20$, показаны на рисунке 2. Из рисунка видно, что функция $q_{i_c}(t)$, описывающая расход жидкости через отдельные каналы статора, является периодической с периодом равным $\tau_{ц}$, причем фазы II и III -го каналов сдвинуты по времени относительно фазы I -го канала на величину τ_{Δ} и $2\tau_{\Delta}$, соответственно.

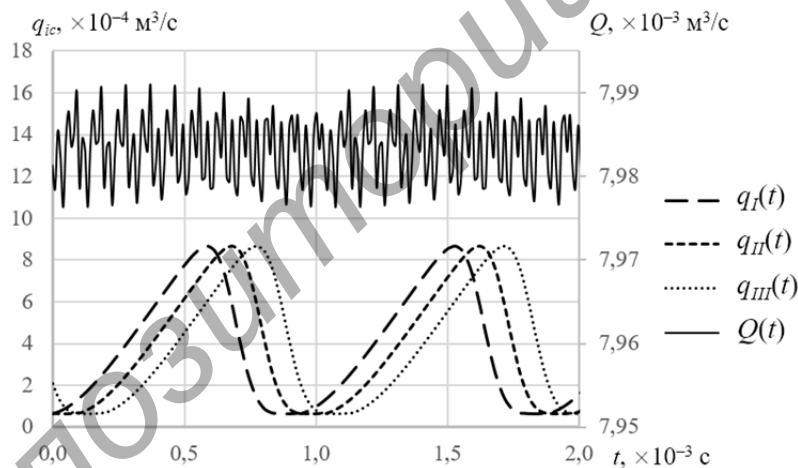


Рисунок 2 — Зависимости расхода жидкости через каналы q и диспергатор Q от времени t

Мгновенный расход Q жидкости через диспергатор может быть определен суммированием расходов q_{i_c} по всем его каналам статора:

$$Q(t) = \sum_{i_c=1}^{z_c} q_{i_c}(t). \quad (9)$$

Анализируя график функции расхода $Q(t)$ на рис. 2 можно отметить, что мгновенный расход жидкости через диспергатор характеризуется периодическими пульсациями, вызываемыми как наложением друг на друга кривых расходов $q_{i_c}(t)$ отдельных каналов статора, так и некоторой погрешностью численного метода решения Рунге—Кутты и используемого алгоритма аппроксимации. Для вышеприведенных значений конструктивно-технологических параметров роторно-импульсного аппарата амплитуда пульсаций $Q(t)$ сравнительно невелика и составляет менее $0,1 \cdot 10^{-4}$ м³/с. Период пульсаций расхода Q в 10 раз короче периода пульсаций его составляющих функций $q_{i_c}(t)$.

Заключение. В результате модификации формулы Бернулли для неустановившегося потока жидкости посредством ввода функции гидравлического сопротивления $\zeta(\tau)$ каналов ротора и статора от относительного времени τ получено дифференциальное уравнение движения жидкости в каналах роторно-импульсного аппарата, учитывающее влияние инерционного давления на соотношение между кинетической и потенциальной энергиями потока.

Список цитируемых источников

1. Промтов, М. А. Машины и аппараты с импульсными энергетическими воздействиями на обрабатываемые вещества / М. А. Промтов. — М. : Изд-во «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. Биохимические предпосылки совершенствования технологий получения гуминовых кислот / А. М. Кулик, П. Ю. Крупенин // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения : сб. науч. работ. — Брянск : Изд-во Брянский ГАУ, 2022. — Вып. 1(21). — С. 117—122.
4. 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.
5. 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.
6. Крупенин, П. Ю. Математическая модель движения кормовой суспензии в каналах роторного импульсного аппарата / П. Ю. Крупенин // Вест. Баранович. гос. ун-та. Сер. Технические науки. — 2018. — Вып. 6. — С. 96—103.
7. Новиковский, Е. А. Работа в системе MathCAD : учебное пособие / Е. А. Новиковский. — Барнаул : Типография АлтГУ, 2013. — 114 с.
8. Cleveland, W. S. Smoothing by local regression: Principles and methods / W. S. Cleveland, C. Loader // Statistical theory and computational aspects of smoothing. — Physica-Verlag HD, 1996. — С. 10—49.

УДК 628.9

А. О. Лазарева, В. С. Солдаткин, Е. И. Нижевич, А. А. Сайнакова

*Учреждение образования, «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»,
Томск, Российская Федерация*

ВЛИЯНИЕ ОСВЕЩЕНИЯ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ ТОМАТОВ ЧЕРРИ

Введение. Для непрерывных поставок овощей и фруктов предлагается метод выращивания растений в условиях закрытого грунта, где это не позволяют сделать климатические условия. Для этого требуется подобрать все необходимые условия: температурный режим, влажность, своевременный полив, и самое главное искусственно созданный световой день. Считается, что самые лучшие условия для выращивания растений являются естественные. Главной задачей стоит «заменить» солнце, правильно подобранным источником излучения. На данный момент в промышленных теплицах используют натриевые лампы, которые являются энергозатратными. Современные технологии позволяют изготавливать высокоэффективные и безопасные светодиодные облучательные приборы для выращивания растений. Такие светильники могут конкурировать с натриевыми, так как в использовании будут потреблять меньше энергии. В данной статье приводятся результаты эксперимента выращивания томатов черри «Балконное чудо» в условиях закрытого грунта с применением двух светодиодных светильников с разным спектром излучения.

Основная часть. Сорт томатов черри «Балконное чудо», агрофирмы «Агрофирма партнер» ГОСТ 32592-2013. подходит для выращивания в промышленных теплицах и для выращивания в домашних условиях [1]. Сорт не прихотлив и не требует специального ухода, устойчив к болезням и колебаниям температуры. Вегетативный срок не превышает трех месяцев. Кусты низкорослые, не нуждаются в пасынковании и подвязывании. Плоды растут гроздьями, средней массой 35 грамм, округлые с гладкой поверхностью, при созревании приобретают ярко — красный цвет, хорошо переносит заморозку. Листья имеют насыщенный темно — зеленый цвет. Для полноценного развития томатам требуется не меньше 7—8 часов освещения в сутки. Влажность воздуха не более 70 %. Температура воздуха не ниже 13 градусов, иначе качество пыльцы ухудшается, и не выше 30 градусов, так как зернышки пыльцы теряют жизнеспособность. Эксперимент проводился с 1.12.2022 по 24.02.2023.

Для проведения исследований выбраны два светодиодных светильника Diora Unit Agro и Diora Quadro Agro [2]. На рисунках 1 и 2 показан внешний вид светильников. Светильник Diora Quadro Agro доступен для покупки в сети DIORA и предназначен для освещения растений, в условиях закрытого грунта, в ситифермах, тепличных комплексах, домашних условиях и в многоярусных установках стеллажного типа. Используется для выращивания растений круглый год, световой поток 4000 лм., имеет 144 светодиода. Излучает белый свет. Габариты светильника 390 × 195 × 70 мм.

Экспериментальный образец Diora Unit Agro отличается от светильников, тем что спектральный состав приходится на максимум 665 нм, то есть светит красным цветом. Световой поток 4786 лм, энергетический поток 44,96 Вт. Габариты светильника 305 × 165 × 25 мм.