

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ В МОДУЛЯТОРЕ ПУЛЬСАЦИОННОГО ГОМОГЕНИЗАТОРА С ВИБРИРУЮЩИМ РОТОРОМ

К.О. Самойчук, А.О. Ивженко

Приведены преимущества использования пульсационного аппарата с вибрирующим ротором для гомогенизации молока. Используя классические гидравлические и математические зависимости, при выполнении условий: равенства величины пульсаций скорости эмульсии в каждом канале статора и ротора и синхронизации пульсаций с осевыми колебаниями ротора, получено уравнение для определения скорости эмульсии в отверстиях модулятора пульсационного гомогенизатора с вибрирующим ротором.

Введение

В пищевой, как и во многих других отраслях промышленности, широко распространены процессы гомогенизации и диспергирования. Аппараты, которые используются для их проведения, имеют ряд существенных недостатков и часто не отвечают современным требованиям качества и энергосбережения. Например, при переработке молока клапанные гомогенизаторы имеют энергозатраты более 8 кВт/т и быстрый износ пар плунжеров и рабочих органов, струйные – повышенное вспенивание молока, вакуумные – не обеспечивают высокую степень диспергирования и т. д. Поэтому задача усовершенствования существующих конструкций гомогенизаторов, например за счет концентрации энергии на поверхности раздела фаз эмульсии и эффективного ее распределения по объему продукта, который обрабатывается, является актуальной [1, 2].

Среди огромного количества конструкций аппаратов для гомогенизации и диспергирования благодаря комплексному влиянию на рабочую среду, создания максимального градиента скорости и кавитационного воздействия выделяются роторно-пульсационные аппараты (РПА), предназначенные для получения стабильных высокодисперсных эмульсий и суспензий [3, 4].

Недостатком при гомогенизации молока в РПА является присутствие частиц жира крупной фракции, которые образовались или в результате коалесценции жировых шариков или попали в зону недостаточного энергетического влияния и не были разрушены [2]. Лишены этого недостатка РПА, ротор которых осуществляет колебание вдоль оси вращения [5, 6]. Пульсационные аппараты с вибрирующим ротором (ПА с ВР) эффективны благодаря диссипации мощности на границе раздела фаз дисперсной и дисперсионной сред во всем объеме продукта и работе в резонансном режиме. Благодаря этим преимуществам энергозатраты гомогенизации молока в ПА с ВР на 15 % – 30 % ниже, чем в РПА, а дисперсный состав молочной эмульсии характерен для таковой после обработки в клапанных гомогенизаторах [7, 8]. Такие аппараты практически не исследованы, потому настоящая статья является составляющей цикла исследований ПА с ВР, предназначенного для гомогенизации молока.

Установлено, что в ПА с ВР разрушение жировых шариков преимущественно происходит по механизму неустойчивости Релея-Тейлора, где диаметр дисперсных частиц зависит от ускорения потока жидкости при движении молочной эмульсии сквозь каналы прерывателя ПА (отверстия ротора и статора) [9]. Ускорение потока молока вызывает разницу скорости (скольжение) жирового шарика относительно молочной плазмы, который и приводит к разрушению жировой частицы. Для определения среднего размера жирового шарика после гомогенизации необходимо рассчитать величину среднего ускорения молочной эмульсии. Для определения ускорения движения эмульсии в отверстиях модулятора ПА с ВР необходимо определить скорость течения эмульсии через отверстия модулятора ПА в функции времени.

Определение зависимости скорости от времени для потока жидкости в РПА является важнейшей задачей, позволяющей определить закономерности процесса акустической импульс-

ной кавитации, а, следовательно, и качество обработки продукта. Так как ПА с ВР является разновидностью РПА, то проанализируем решение этой задачи для РПА.

Результаты исследований и их обсуждение

Определению закономерностей течения в каналах РПА посвящено огромное количество работ [3, 4, 10–12] и др. Процесс развития гидромеханических моделей течения в каналах статора и ротора подробно представлен в работе [11]. Наиболее простая модель течения в прерывателе РПА основана на уравнении неразрывности потока жидкости, по которой скорость пропорциональна площади проходного сечения. Современная модель течения жидкости в РПА основывается на нестационарном уравнении Бернулли и системе уравнений Навье-Стокса, в которых с учётом многочисленных дополнений учтены: переменное гидравлическое сопротивление для меняющейся площади проходного сечения модулятора, сжимаемость жидкости, переменное давление в полости ротора, дополнительное давление за счёт разгона жидкости при её сцеплении с поверхностью ротора, кориолисовы силы, конические поверхности ротора и статора. Анализируя полученные дифференциальные уравнения, следует отметить, что большинство из них не имеют решения в явном виде [4, 11, 12], потому имеют приближённые решения, сложные для применения в инженерных расчётах при проектировании РПА [10]. Применение их для расчёта ПА с ВР, где на поток эмульсии накладываются различные по фазе, частоте и амплитуде колебания, вызванные вибрацией ротора, является неоправданно сложной задачей. Однако полученные готовые решения и характер функции скорости от времени применим для ПА с ВР при рассмотрении движения эмульсии без учёта осевой вибрации ротора.

Движение эмульсии в модуляторе ПА с ВР V_0 создается за счет (рисунок 1):

- центробежного давления в роторе ПА, создаваемого за счет вращения ротора с лопатками;
- выталкивающего или всасывающего жидкость движения ротора вдоль оси вращения.

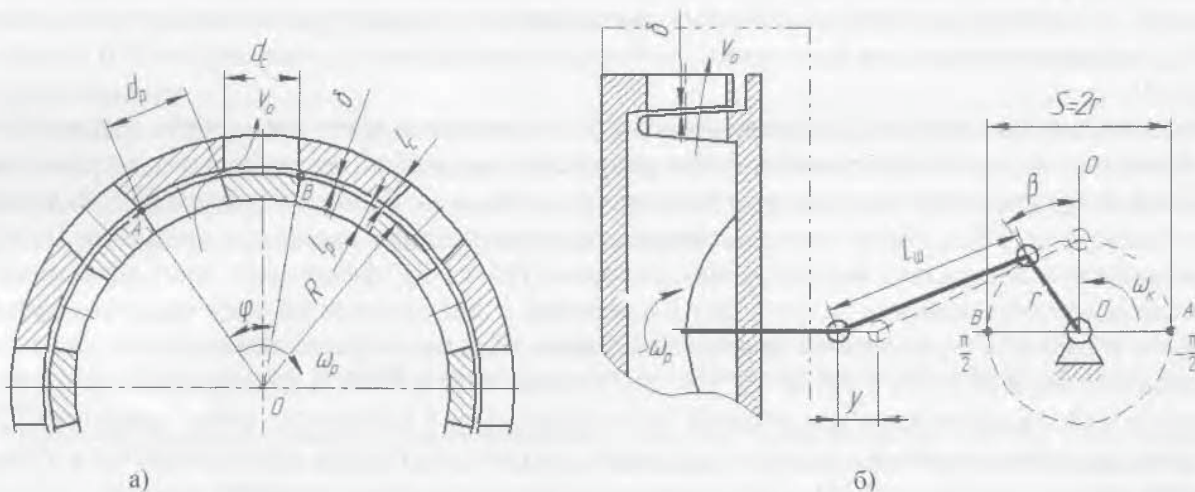


Рисунок 1 – Расчётная схема ПА с ВР: а – схема ротора и статора, б – схема привода вибрации ротора – кривошипного механизма

Поставленную задачу нахождения скорости эмульсии в функции от времени (или угла поворота ротора) будем решать в три этапа. На первом – определим скорость эмульсии при колебательных осевых движениях (вибрации) ротора, не учитывая центробежное давление жидкости, которое создается при вращении ротора v_n^n . На втором – скорость эмульсии при прохождении прерывателя ПА, которая вызвана только центробежными силами v_0^s . На третьем – найдем суммарную скорость жидкости в прерывателе ПА с ВР v_0 .

Определение скорости эмульсии при колебательных осевых движениях ротора, не учитывая центробежное давление жидкости.

При осевых колебаниях ротора жидкость, вытесняемая ротором, $Q_p(t)$, м³/с, проходит сквозь отверстия прерывателя ПА, формируя расход через модулятор ПА с ВР $Q_o(t)$, м³/с. Тогда на основе условия неразрывности потока

$$Q_p(t) = Q_o(t), \quad (1)$$

где t – время процесса, с.

При постоянной частоте вращения ротора и кривошипа $n_p = \text{const}$, $n_k = \text{const}$ последнее равенство можно представить в виде

$$Q_p(\beta) = Q_o(\varphi), \quad (2)$$

где β – угол поворота кривошипа ПА с ВР, рад;

φ – угол поворота ротора ПА с ВР, рад.

По известной формуле

$$Q_o(\varphi) = v_o^n(\varphi) \cdot S(\varphi), \quad (3)$$

где $v_o^n(\varphi)$ – скорость эмульсии сквозь отверстия прерывателя, м/с;

$S(\varphi)$ – площадь отверстий модулятора ПА, м².

Расход эмульсии при движении ротора на величину y (рисунок 1б) в любой момент времени можно найти по формуле

$$Q_p(t) = v_p(t) \frac{\pi D^2}{4}, \quad (4)$$

где D – диаметр ротора, м;

$v_p(t) = \frac{dy}{dt}$ – скорость движения ротора вдоль оси вращения, м/с.

Для малых синусоидальных колебаний при $r/L_u \rightarrow 0$ (для ПА с ВР радиус кривошипа привода вращения ротора r составляет до 1,5 мм, что намного меньше длины шатуна L_u) можно написать [13]

$$\frac{dy}{dt} = v(t) = \pi n_k s \cdot \cos \beta, \quad (5)$$

где s – амплитуда колебаний ротора $s = 2r$, м.

Для выполнения требования создания гармоничных пульсаций эмульсии в отверстиях ПА для синхронизации с осевыми колебаниями ротора количество отверстий ротора и статора должно быть одинаковым $z_p = z_c = z$, поскольку все каналы прерывателя должны быть в равных условиях. По аналогичным соображениям диаметры отверстий ротора и статора также должны быть равны $d_p = d_c$. Для этих условий изменение площади отверстий прерывателя ПА с круглыми отверстиями с удовлетворительной точностью описывается уравнением

$$S(\varphi) = \frac{\pi d_p^2 z}{8} \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + \pi d_p \delta z. \quad (6)$$

С учетом уравнений (4), (5) и (6) условие неразрывности потока (3) представим в виде

$$\pi n_k s \cdot \cos \beta \frac{\pi D^2}{4} = v_o^n(\varphi) \left(\frac{\pi d_p^2 z}{8} \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + \pi d_p \delta z \right). \quad (7)$$

Таким образом, скорость движения эмульсии сквозь отверстия прерывателя ПА с ВР v_a^n как функция угла поворота кривошипа

$$v_a^n = \frac{\pi^2 n_k r \cdot D^2 \cos \beta}{\pi d_p^2 z \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\pi d_p \delta z} \quad (8)$$

Количество отверстий ротора связано с диаметром ротора и диаметром отверстий соотношением, которое следует из очевидных геометрических преобразований:

$$d_p = \frac{\pi D}{2z} \quad (9)$$

С учетом последнего уравнение (8) приобретает вид

$$v_a^n = \frac{2 n_k r \cdot D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + \delta \delta} \quad (10)$$

Определение скорости эмульсии при прохождении прерывателя ПА, которая вызвана только центробежными силами.

Рассмотрим движение жидкости при вращении ротора ПА и периодическому открыванию и закрыванию отверстий модулятора. Как было отмечено выше, характер процессов изменения скорости жидкости в модуляторе достаточно хорошо изучен [4, 10, 11]. В соответствии с проведенными исследованиями в процессе открывания каналов статора обрабатываемая среда в прерывателе аппарата разгоняется, а ее скорость увеличивается, как показано на рисунке 2 [10]:

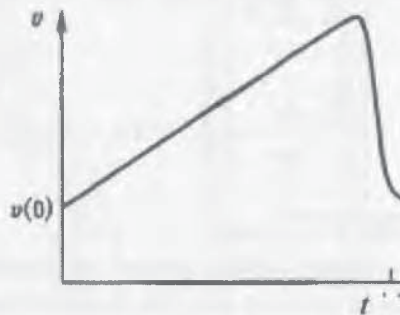


Рисунок 2 – Характер зависимости скорости в канале статора от времени

Моноotonно растущая часть функции на последнем рисунке описывается следующим образом [10]:

$$v_a^s(t) = v(0) + \frac{\Delta P}{\rho l} t, \quad (11)$$

где $v(0)$ – начальная скорость, м/с;

ΔP – перепад давления между входом в канал ротора и выходом из канала статора, Па;

ρ – плотность обрабатываемой среды, кг/м³;

l – длина канала модулятора, м.

Последнее уравнение действительно на промежутке времени, равном циклу изменения

площади прерывателя ($0 \leq \varphi \leq t_u$).

$$v_o^a(t) = v(0) + \frac{\Delta P}{\rho l} t_u \left\{ \frac{t}{t_u} \right\}, \quad (12)$$

где t_u – время цикла изменения площади прерывателя, с;

$\left\{ \frac{t}{t_u} \right\}$ – дробная часть числа $\frac{t}{t_u}$.

Начальная скорость определяется из уравнения

$$v(0) = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \zeta_{max}}}, \quad (13)$$

где ζ_{max} – максимальное гидравлическое сопротивление (коэффициент местного гидравлического сопротивления пары "канал ротора – канал статора" при закрытых каналах).

$$\zeta_{max} = \left(\frac{S_{max}}{\varepsilon \cdot S_{min}} - 1 \right)^2, \quad (14)$$

где S_{max} – максимальная площадь прерывателя, м²;

S_{min} – минимальная площадь прерывателя, м²;

ε – коэффициент сжатия потока.

Представим последнее уравнение в виде

$$\zeta_{max} = \left(\frac{1}{\varepsilon \frac{S_{min}}{S_{max}}} - 1 \right)^2. \quad (15)$$

Тогда, учитывая, что $S_{min} = \pi d_p \delta z$ а $S_{max} = \pi z d_p^2 / 4$, после преобразований получим

$$\frac{S_{min}}{S_{max}} = \frac{4\delta}{d}. \quad (16)$$

Для каждого из соотношений S_{min} / S_{max} из таблиц Жуковского определяется ε [10].

В случае, когда ротор ПА имеет лопасти, которые приводят жидкость, поступающую в полость ротора, во вращательное движение, перепад давления между полостью РПА и рабочей камерой определяется из выражения

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho \omega_p^2 R^2, \quad (17)$$

где ρ – плотность обрабатываемого продукта, кг/м³;

ω_p – угловая скорость вращения ротора, рад/с;

R – радиус ротора, м.

Длина каналов модулятора

$$l = l_p + \delta + l_c, \quad (18)$$

где l_p – длина ротора, м;

δ – радиальный зазор между ротором и статором, м;

l_c – длина статора, м.

С учетом последних уравнений и последующих преобразований выражение для мгновенной скорости запишем в виде

$$v_o^g(t) = \frac{\omega_p D}{2\sqrt{\xi_{max}}} + \frac{\omega_p^2 D^2}{8(l_p + \delta + l_c)} t_u \left\{ \frac{t}{t_u} \right\}. \quad (19)$$

Выразим время в последней формуле через функцию угла поворота ротора φ , учитывая, что $t = \varphi / \omega_p$, $t_u = 2\pi / z\omega_p$

$$v_o^g(\varphi) = \frac{\omega_p D}{2\sqrt{\xi_{max}}} + \frac{\omega_p D^2 \pi}{4z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (20)$$

Или

$$v_o^g(\varphi) = \frac{\pi n_p D}{60\sqrt{\xi_{max}}} + \frac{\pi^2 n_p D^2}{120z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (21)$$

Для малых зазоров δ (что реализуется в ПА с ВР) скорость $v(\theta)$ намного меньше максимальной скорости [10], поэтому последнюю зависимость можно записать в виде

$$v_o^g(\varphi) = \frac{\pi^2 n_p D^2}{120z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (22)$$

Суммарную скорость жидкости в прерывателе ПА с ВР найдем как сумму скоростей v_o^g и v_o^n :

$$\vec{v}_o = \vec{v}_o^n + \vec{v}_o^g. \quad (23)$$

Переходя от векторной формы уравнения к скалярной, учитывая, что линии тока жидкости между этими векторами совпадают

$$v_o = v_o^n + v_o^g. \quad (24)$$

Следовательно, с учетом (10) и (22) скорость движения жидкости в отверстиях модулятора ПА с ВР

$$v_o = \frac{2 n_k r D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin\left(\varphi z - \frac{\pi}{2}\right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_p D^2}{120z(l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\varphi z}{2\pi} \right\}. \quad (25)$$

Анализируя последнее выражение, нетрудно определить, что для увеличения скорости течения эмульсии через отверстия прерывателя (для повышения степени диспергирования эмульсии) необходимо выполнение условий

$$v_o \rightarrow \max \begin{cases} n_k, n_p, r, D \rightarrow \max; \\ \delta, l_p, l_c \rightarrow \min. \end{cases} \quad (26)$$

Для работы ПА с ВР в энергоэффективном – резонансном режиме необходима синхронизация частоты вращения ротора и кривошипа

$$n_p = \frac{n_k}{z} \text{ и } \varphi = \frac{\beta}{z}. \quad (27)$$

Таким образом, при работе ПА с ВР в резонансном режиме результирующая скорость по формуле (25) станет равна

$$v_o = \frac{2 n_k r D \cos \beta}{\frac{\pi D}{2z} \left(1 + \sin \left(\beta - \frac{\pi}{2} \right) \right) + 8\delta} + \frac{\pi^2 n_k D^2}{120z^2 (l_p + \delta + l_c)} \left\{ \frac{\beta}{2\pi} \right\}. \quad (28)$$

Изменение количества отверстий z не изменяет максимальную скорость (рисунок 3), но влияет на крутизну линии v_o . В целом можно утверждать, что влиянием z на v_o можно пренебречь.

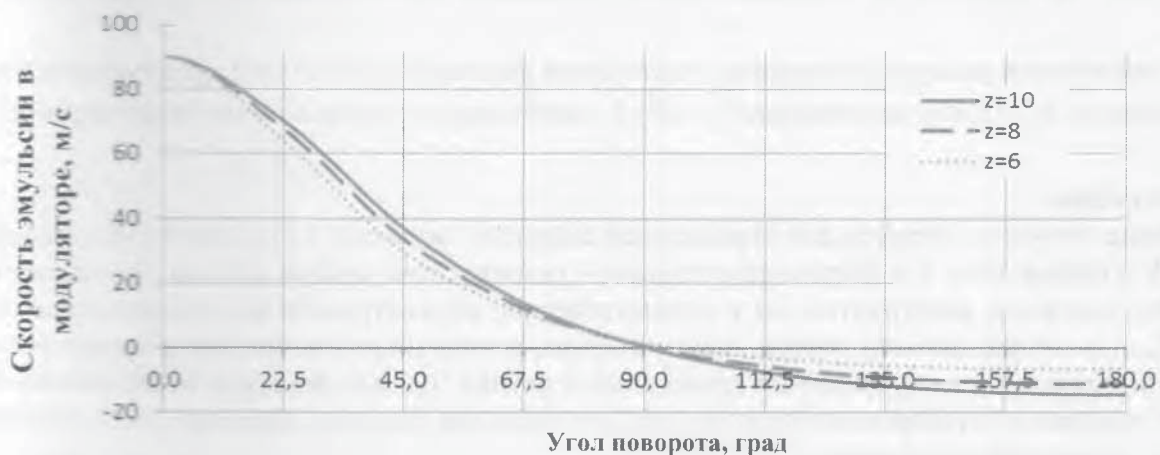


Рисунок 3 – Влияние количества отверстий ротора z на скорость v_o (при $D=0,125$ м, $n_k=2880$ об/мин, $r=1$ мм, $\delta=1$ мм, $l_p=5$ мм, $l_c=10$ мм)

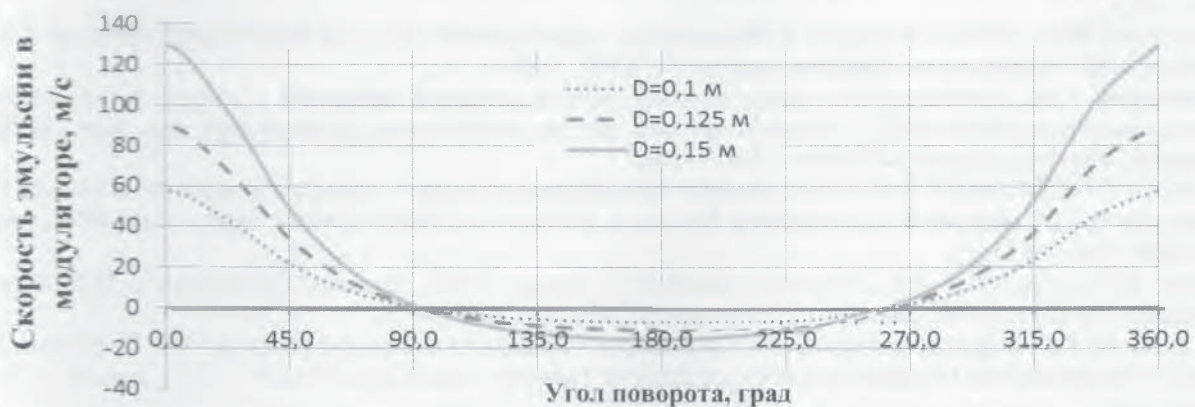


Рисунок 4 – Влияние диаметра ротора на v_o (при $n_k=2880$ об/мин, $r=1$ мм, $\delta=1$ мм, $l_p=5$ мм, $l_c=10$ мм, $z=8$)

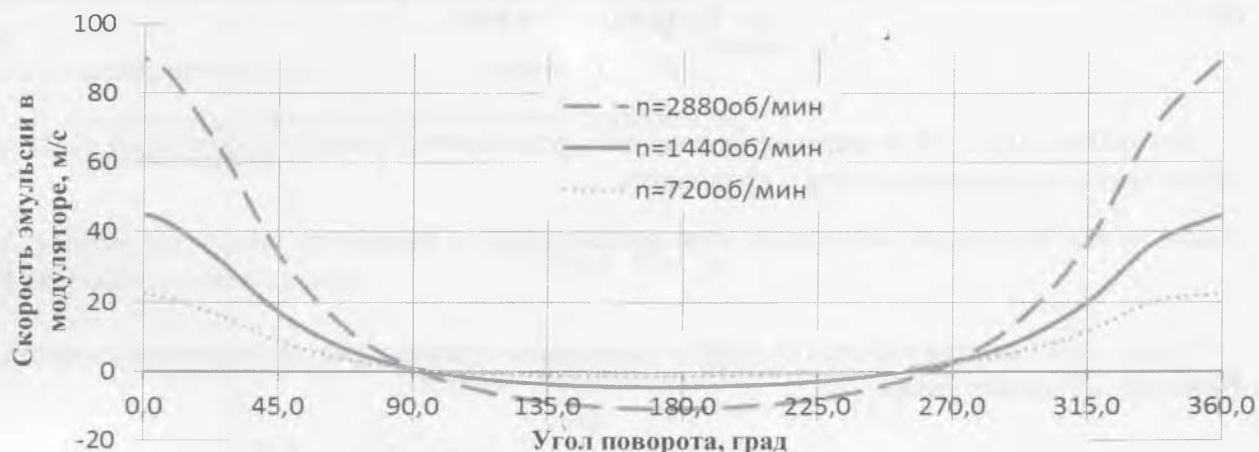


Рисунок 5 – Влияние частоты вращения кривошипа на v_o (при $D=0,125$ м, $r=1$ мм, $\delta=1$ мм, $l_p=5$ мм, $l_c=10$ мм, $z=8$)

Диаметр ротора практически не влияет на скорость v_o'' , но является основным фактором увеличения v_o'' (рисунок 4). Влияние частоты вращения вала кривошипа показано на рисунке 5.

При увеличении радиуса кривошипа (увеличении амплитуды вибрации) пропорционально увеличивается v_o'' . Длину модулятора ($l_p + \delta + l_c$) необходимо уменьшать для увеличения v_o'' .

Заключение

Впервые получена формула для определения скорости эмульсии в отверстиях модулятора ПА с ВР в общем виде и в энергоэффективном – резонансном режиме работы. Зависимость связывает основные конструктивные и кинематические параметры аппарата: количество отверстий модулятора, диаметр ротора, длины статора, ротора и кривошипа, зазор между ротором и статором и частоты вращения кривошипа и ротора. Данная формула является ключевой для определения ускорения эмульсии, среднего размера жировых шариков после гомогенизации и энергозатрат аппарата.

Литература

- 1 Нужин, Е.В. Гомогенизация и гомогенизаторы /Е.В. Нужин, А.К. Глушук. Монография – Одесса: Печатный дом, 2007. – 264 с.
- 2 Фиалкова, Е.А. Гомогенизация. Новый взгляд: Монография–справочник/ Е.А. Фиалкова – СПб.: ГИОРД, 2006. – 392с.
- 3 Промтов, М.А. Машини і апарати з імпульсними енергетичними діями на оброблювані речовини / А.М. Промтов. – М.: «Видавництво Машиностроение-1», 2004. – 136 с.
- 4 Червяков, В.М. Теоретические основы методов расчета роторных аппаратов с учетом нестационарных гидродинамических течений/В.М. Червяков. автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук.: 05.02.13 «Машини, агрегати и процессы»Тамбов, 2007. – 35с.
- 5 Пат. 2203728 РФ, МКИ7 В 01 F 7/00. Роторно-пульсационный аппарат с вибрирующим ротором/ Иванец Г.Е., Плотников В.А., Сафонова Е.А., Артемасов В.В. и др. (РФ) // – № 2001111249/12; заявл. 23.04.2001 ; опубл. 10.05.2003, Бюл. № 13.
- 6 Пат. 63772 UA, В01F 7/12. Роторно-пульсационний апарат / А.О. Івженко, О.В. Гвоздєв, О.В. Івженко (Україна). – № u201101600; заявл. 11.02.2011; опубл. 25.10.2011, Бюл. № 20.
- 7 Самойчук, К.О. Розрахунок енерговитрат пульсационного апарата з вібруючим ротором / К.О. Самойчук, А.О. Івженко //Наукові праці Одеської національної академії харчових виробництв: Одеса – 2013.– Вип. 43. – Том 2 С. 133–137.
- 8 Самойчук, К.О. Експериментальні дослідження диспергування жирової емульсії в іпульсационному апараті з вібруючим ротором / К.О. Самойчук, А.О. Івженко // Обладнання та технології харчових виробництв : Донецьк – 2013. – Вип. 30. – С. 155–161.

- 9 Самойчук, К.О. Механізми диспергування жирової фази в пульсаційному апараті з вібруючим ротором / К.О. Самойчук, А.О. Івженко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету: Мелітополь – 2014. – Вип. 13. – Том 7 С. 11–20.
- 10 Балабышко, А.М. Гидромеханическое диспергирование / А.М. Балабышко, А.И. Зимин, В.П. Ружицкий. М: Наука, 1998. – 331 с.
- 11 Кухленко, А.А. Совершенствование методов расчета технологических параметров аппарата роторно-пульсационного типа для приготовления эмульсий: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / А.А.Кухленко– Бийск, 2007. – 125 с.
- 12 Долинский, А.А. Тепломассообмен и гидродинамика в паро-жидкостных дисперсных средах. Теплофизические основы дискретно-импульсного ввода энергии / А.А.Долинский, Г.К.Иваницкий – К.: Наук. думка, 2008. – 381 с.
- 13 Вибрационные массообменные аппараты / И.Я. Городецкий, А.А. Васин, В.М. Олевский, П.А Лупанов. – М.: Химия, 1980. – 189 с.

Поступила в редакцию 02.05.2014