

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ТА АЛГОРИТМИ



Моделирование процессов гомогенизации жидкостей в вихревых аппаратах

ПАВЛЕНКО А.М., ОСЕННЯЯ О.С.

Днепропетровский государственный технический университет

В статье предложена методика оценки основных конструктивных параметров вихревых камер, в которых происходит гомогенизация жидких топлив путем комплексного гидродинамического и термодинамического воздействия на структуру первичных эмульгированных сред.

В статті запропонована методика оцінки основних конструктивних параметрів вихрових камер, в яких відбувається гомогенізація рідких палив шляхом комплексної гідродинамічної і термодинамічної дії на структуру первинних емульгованих середовищ.

The method of estimation of basic structural parameters of vortical chambers in which homogenization of oil-fuels is by the complex hydrodynamic and thermodynamics affecting structure of the primary emulsified environments is offered in the article .

Введение. Эмульгированные гомогенные жидкости (ЭГМ) используются во многих технологических процессах в различных отраслях промышленности. Поэтому и методики аппаратного исполнения технологий гомогенизации достаточно хорошо исследованы. Если к структуре данных составов предъявляются более строгие требования по дисперсности и устойчивости, то как правило прибегают к математическому моделированию основных рабочих процессов с целью последующей оптимизации конструкции аппаратов. Примером ЭГМ могут быть гомогенизированные мазуты. Формирование заданной структуры может происходить в вихревом аппарате, который устанавливается непосредственно перед сжигательными устройствами. Разогретый мазут поступает в вихревую смесительную камеру, туда же подается насыщенный водяной пар. В вихревом слое на начальной стадии контакта формируются две среды – сплошная (мазут) и паровые трубки, которые в процессе движения конденсируются и дробятся.

Цель работы – разработать методику количественной оценки гидродинамических характеристик вихревого гомогенизатора.

Материалы и результаты исследований. В [1] анализируются параметры вихревого аппарата с целью определения их оптимального соотношения. В основу исследований следует заложить модель течения жидкости в вихревой камере, предложенную в работе [1].

В работе [2] установлено существование наиболее выгодного для потока в камере закручивания отношения r_c/R_k (r_c – радиус сопла). Наличие экстремума на графике зависимости угла факела от геометрической характеристики, если последнюю изменять посредством увеличения R_k , было отмечено в работе [3]. Поиск оптимальных размеров камеры закручивания являлся

одной важных задач экспериментальных исследований аэродинамики вихревого испарителя.

В работе [4] автор считает, что по уровню гидравлического сопротивления не приемлемы камеры с $r_c/R_k < 0.33$, а по уровню относительных скоростей и крутке потока не приемлемы камеры с $r_c/R_k > 0.6$. Оптимальное значение r_c/R_k лежит в пределах $0.35 \dots 0.5$. Исследования аэродинамического сопротивления камер в диапазоне $r_c/R_k = 0.2 \dots 1$ показали, что минимальные потери достигаются в камере открытого типа с $r_c/R_k = 0.8 \dots 1$. Анализ опубликованных работ показал, что до настоящего времени вопрос об оптимуме r_c/R_k для камер закручивания остается открытым. Анализ формул для k и газодинамической характеристики камеры показывает, что при увеличении R_k имеет место рост Ar – гидродинамическая характеристика устройства, а затем его уменьшение вследствие снижения k .

Таким образом при реализуемом k имеет место только одно значение r_c/R_k с максимальным значением Ar (рисунок 1). С целью определения зависимости (r_c/R_k) от k исследуем на экстремум соотношение для газодинамической характеристики гомогенизатора [1], переписанное так

$$Ar = \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(\frac{r_c}{R_k} \right)^{1-0.96} \lg \left[\frac{Q}{2\pi H \nu} \frac{f_k}{R_k^2} \right] \quad (1)$$

с условием

$$\begin{aligned} dAr/dR_k = 0. \ln Ar = \ln \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(1 - 0.96 \lg \frac{Q}{2\pi H \nu} \frac{f_k}{R_k^2} \right) \ln \frac{r_c}{R_k} \\ \frac{1}{Ar} \frac{dAr}{dR_k} = \frac{\partial}{\partial m} \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(\frac{1.92}{R_k} \right) \ln \frac{r_c}{R_k} + \\ + \ln \frac{\pi r_c^2}{f_k} \eta \left(1 - 0.96 \lg \frac{Q}{2\pi H \nu} \frac{f_k}{R_k^2} \right) \left(- \frac{1}{R_k} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

Решая уравнение (2), получим трансцендентное уравнение, из которого можно определить соотношение (r_c/R_k) :

$$\frac{1}{R_k} \left[1,92 \ln \left(\frac{\pi r_c^2}{f_k} \right) \ln \frac{r_c}{R_k} - \left(1 - 0,96 \lg \frac{Q}{2\pi H v R_k^2} \frac{f_k}{R_k^2} \right) \ln \left(\frac{\pi r_c^2 \eta}{f_k} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

Решение уравнений (1) и (3) представлены на рисунке 1.

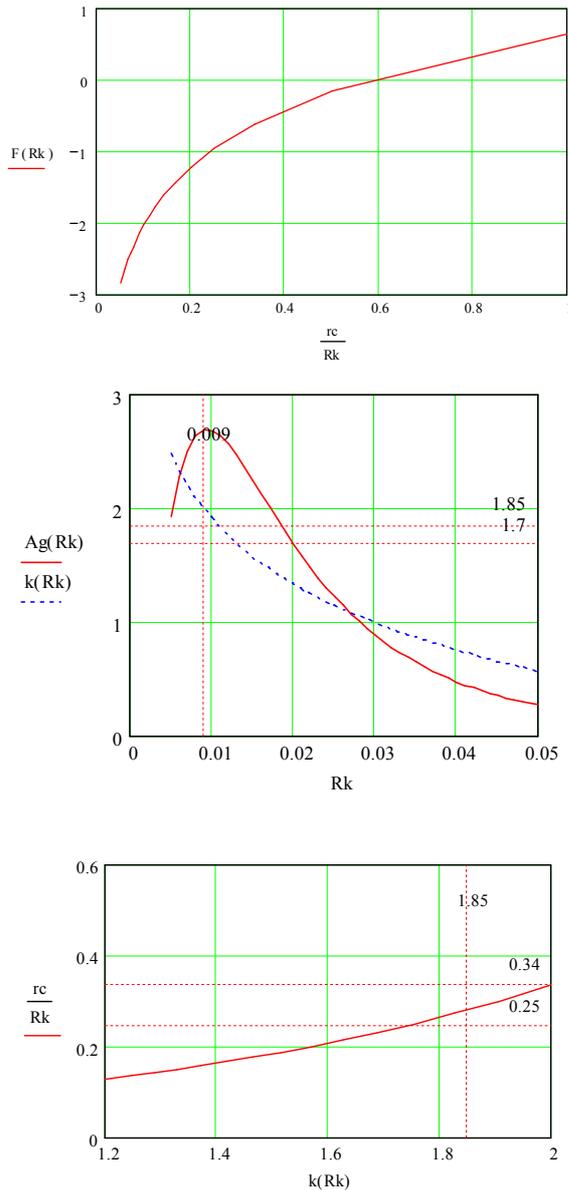


Рис. 1. Решение уравнений (1) и (3): $Q=0.043 \text{ м}^3/\text{с}$; $v=1000 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $f_k=2,826 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $r_c=3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $R_k=5 \cdot 10^{-3}, 6 \cdot 10^{-3} \dots 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $m=1$ $H=20 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.
Для

$$k(R_k) = 0,96 \log \left[\frac{Q}{2H \cdot 3,14 v} m \frac{f_k}{r_c^2} \left(\frac{r_c}{R_k} \right)^2 \right]$$

$$Ag(R_k) = 3,14 \frac{r_c^2 \cdot 0,9 \left(\frac{r_c}{R_k} \right)^{1-k(R_k)}}{m f_k}$$

$\eta=0.9$; $Q=0.05 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $W=12 \text{ м}/\text{с}$; $f=Q/W$, м^2 ; $f=4.167 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$; $r_c=0.0015 \text{ м}$; $v=1.12 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $H=0.03 \text{ м}$; $R_k=0.0015, 0.003 \dots 0.03 \text{ м}$.

$$k(R_k) = 0,96 \log \left(\frac{Q \frac{f}{R_k^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot H \cdot v} \right)$$

Уравнение (3) представлено в виде

$$F(R_k) = 2 \cdot 0,96 \cdot \ln \left(3,14 \frac{r_c^2}{f} \eta \right) \cdot \ln \left(\frac{r_c}{R_k} \right) - \left(1 - 0,96 \cdot \log \left(\frac{Q \frac{f}{R_k^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot H \cdot v} \right) \right) \cdot \ln \left(3,14 \frac{r_c^2}{f} \eta \right)$$

Рассмотрим вихревое течение среды с целью определения оптимальных гидродинамических параметров. В общей постановке задача может быть представлена в следующем виде:

$$V|_{r=1} = -1, \quad (4)$$

для уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\rho r V) = -\gamma(r), \quad (5)$$

где $\gamma(r)$ – функция изменения массы вихревого потока (в случае конденсации пара).

Основным фактором, влияющим на давление насыщения является начальное давление и температура. Начальное давление формирует определенный потенциальный барьер состояния жидкости, при прохождении которого происходит парообразование или конденсация. Условия существования метастабильного равновесия формируются независимо от условий термодинамического равновесия фаз и обуславливается содержанием растворенного газа, концентрацией глобул дисперсной фазы и микропузырьков в жидкости и др. [1].

Используя [1], а также диаграммное представление процесса конденсации, можно определить критическую скорость γ [$\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$], учитывая равенство $\frac{d\gamma}{dP} = 0$.

Опустив выполненные вычисления, приведем расчетные данные в виде графиков (рисунок 2). Расчетные данные, полученные по диаграммному методу соответствуют данным работы [1]. На рисунке 2а) показана максимально возможная массовая скорость с 1 м^2 площади. При учете площади газового вихря в гомогенизаторе получим значения γ [$\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$], показанные на графиках. Из рисунков следует, что расчетные и экспериментальные данные согласуются с небольшой погрешностью. Характер зависимостей можно считать общим. Из графиков также следует, что функция γ [$\text{кг}/(\text{м}^2\text{с})$] имеет степенной вид, поэтому представление массовой скорости в математической модели степенным рядом вполне оправдано.

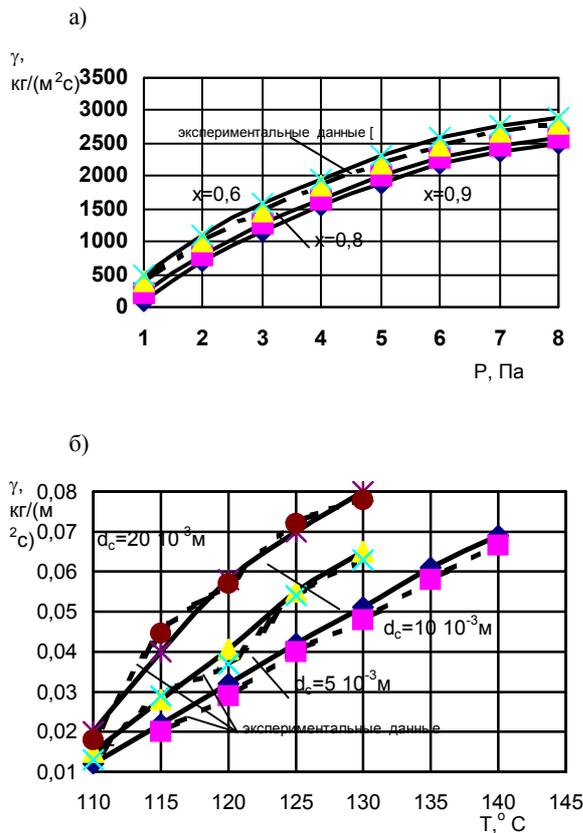


Рис. 2. Расчетная массовая скорость с 1 м² площади

Наилучшее приближение аппроксимирующей функции можно представить в степенном виде. Показатель степени и коэффициенты определялись по следующим уравнениям:

- показатель степени

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \sum_{i=1}^N \ln G_i - N \sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \ln G_i}{\left(\sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \right)^2 - N \sum_{i=1}^N (\ln r_i(T))^2};$$

- коэффициент

$$A = \exp \left\{ \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N \ln G_i - \alpha \sum_{i=1}^N \ln r_i(T) \right) \right\},$$

где N-количество опытов.

В результате расчетов получена зависимость

$$G = 2,5r^{-1,39},$$

Из графиков следует, что при конденсации пара в жидкости составляющие скорости жидкой фазы находятся ниже однофазного потока, а в паровом вихре скорость увеличивается.

Рассмотрим далее

$$W|_{r=1} = 1, \tag{6}$$

$$rW|_{r=0} = 0 \tag{7}$$

для уравнения

$$\rho V \frac{d}{dr} (rW) = \frac{1}{k} \frac{d}{dr} \frac{d}{dr} (rW) + \gamma W \tag{8}$$

Решение можно представить в виде:

$$\rho r V = - \int_1^r \gamma(x) x dx - 1$$

Коэффициент при интегрировании уравнения (8) можно найти из граничного условия

$$\lim_{r \rightarrow 0} C_1 = C_1 = \lim_{r \rightarrow 0} r(rW)' + \lim_{r \rightarrow 0} \left(k - 2 + k \int_1^r \gamma(x) x dx \right) (rW) = 0 \tag{9}$$

$$W(r) = r^{1-k} \exp \left[-k \int_1^r \frac{1}{Z} \int_1^Z x \gamma(x) dx dZ \right] \tag{10}$$

Если функцию изменения массы потока представить в виде $\gamma(r) = A_1 + A_2 r^\alpha$, получим решение

$$f_1(r) = \left[-\frac{A_1}{2} r - A_2 \frac{r^{\alpha+1}}{\alpha+2} + \left(\frac{A_1-2}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \frac{1}{r} \right].$$

$$\cdot \left[-\frac{A_1}{2\rho} - A_2 \frac{(\alpha+1)}{(\alpha+2)\rho} r^\alpha - \left(\frac{A_1-2}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \frac{1}{\rho r^2} \right] +$$

$$+ \frac{4}{3k} A_2 \frac{\alpha r^{\alpha-1}}{\rho} - (A_1 + A_2 r^\alpha).$$

$$\cdot \left[-\frac{A_1 r}{2\rho} - \frac{A_2 r^{\alpha+1}}{\rho(\alpha+2)} + \left(\frac{A_1-2}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \frac{1}{r\rho} \right]$$

$$f_2(r) = A_1 \frac{r^2}{2} + A_2 \frac{r^{\alpha+2}}{(\alpha+2)^2} - \left(\frac{A_1}{2} + \frac{A_2}{\alpha+2} \right) \ln r - \frac{A_1}{4} -$$

$$- A_2 \frac{1}{(\alpha+2)^2}$$

$$f_3(r) = x \rho M_k^2 f_2^2(r) r^{1-2k} - x \left(\frac{M_k}{B} \right)^2 f_1(r)$$

Распределение давления при оптимальном соотношении радиусов

$$P(r) = 1 - \int_r^1 f_3(r) dr \tag{11}.$$

Полученное решение соответствует оптимальным значениям скорости потока, давления и соотношению геометрических параметров вихревого испарителя. По уравнению (11) можно определить давление насыщения и координаты зарождения вторичной фазы. При этом энергетические затраты на реализацию процесса разделения ЭТС будут минимальными.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко А.М. Стійкість емульсій при технологічних впливах. – Дніпропетровськ: Наука і освіта, 2001. – 140с.
2. Павленко А.М. Структурообразование и дезинтеграция эмульсий в вихревых аппаратах/Павленко А.М., Басок Б.И. Днепродзержинск: ДГТУ, 2009. – 205с.
3. Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф. Распыливание жидкостей/ Бородин В.А., Дитякин Ю.Ф. М: машиностроение, 1967. – 267с.
4. Ляховский Д.Н. Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах. М: Госэнергоиздат, 1958 – 67с.

