

УДК 663.64.057

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В КАМЕРЕ СМЕШЕНИЯ СТРУЙНЫХ АППАРАТОВ

Игнатов В.Е., Марков А.А., Шахов С.В., Нестеров Д.А.

Воронежский государственный университет инженерных технологий,
Воронеж, e-mail: s_shahov@mail.ru

В статье для характеристики в струйном аппарате двухфазного потока, состоящего из жидкой и газовой фаз, определены показатели и основные уравнения, которым подчиняется работа: законы сохранения массы, импульса и энергии. При этом двухфазный поток в камере смешения струйного аппарата разделен на два участка: начальный и зону молочно-белой эмульсии. Закономерности течения двухфазной среды на начальном участке в камере смешения описаны системой дифференциальных уравнений. Входными данными для расчета параметров в зоне гомогенного потока стали данные последнего шага расчета начального участка. После чего получена система дифференциальных уравнений, описывающих процессы гидродинамики и массопередачи в области молочно-белой эмульсии. Полученная модель позволяет адекватно описать массообменные процессы в струйных аппаратах.

Ключевые слова: струйные аппараты, напитки, насыщение, кислород, инъекция

THE CALCULATION OF THE MASS TRANSFER PROCESSES PARAMETERS IN THE JET DEVICES MIXING CHAMBER

Ignatov V.E., Markov A.A., Shakhov S.V., Nesterov D.A.

Voronezh state university of engineering technologies, Voronezh, e-mail: s_shahov@mail.ru

The indicators and the basic equations that govern the work: the law of conservation of mass, impulse and energy are identified in the article to the features in the two-phase flow of the jet device, consisting of liquid and gas phases. The two-phase flow in the mixing chamber of the jet device is divided into two parts: an initial zone and milky white emulsion zone. Conformity with law of a two-phase medium flow in the initial part of the mixing chamber are described by the differential equations. The input data for the calculation of parameters in the homogeneous flow area are the data of final calculation for the entry area. After that, a system of differential equations describing hydrodynamics processes and mass transfer processes in the field of milk-white emulsion were obtained. The resulting model can adequately describe the mass transfer processes in the jet device.

Keywords: jet devices, softdrinks, saturation, oxygen enjection

Струйные аппараты очень широко применяются практически во всех отраслях промышленности: в энергетике, в теплофикационных установках, холодильных установках, в водопроводных установках, для транспортировки жидких и твердых материалов. Струйные аппараты успешно применяются для насыщения воды и безалкогольных напитков различными газами, например, диоксидом углерода или кислородом [1, 2, 3].

Основным принципиальным качеством струйных аппаратов (рисунк) является повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии.

Для характеристики в струйном аппарате двухфазного потока, состоящего из жидкой и газовой фаз, применяются следующие показатели [5]:

φ – объемная концентрация фазы, численно равная отношению объема, занимаемого фазой, к общему объему двухфазной среды.

Очевидно, что

$$\varphi_p + \varphi_g = 1, \quad (1)$$

где φ_p и φ_g – соответственно объемные концентрации жидкой и газовой фаз; X – мас-

совая концентрация фазы, численно равная отношению массы фазы в единице объема к массе двухфазного потока.

$$x_p + x_g = 1. \quad (2)$$

Плотность двухфазного потока определяется по зависимости

$$\rho = \rho_p \varphi_p + \rho_g \varphi_g = 1. \quad (3)$$

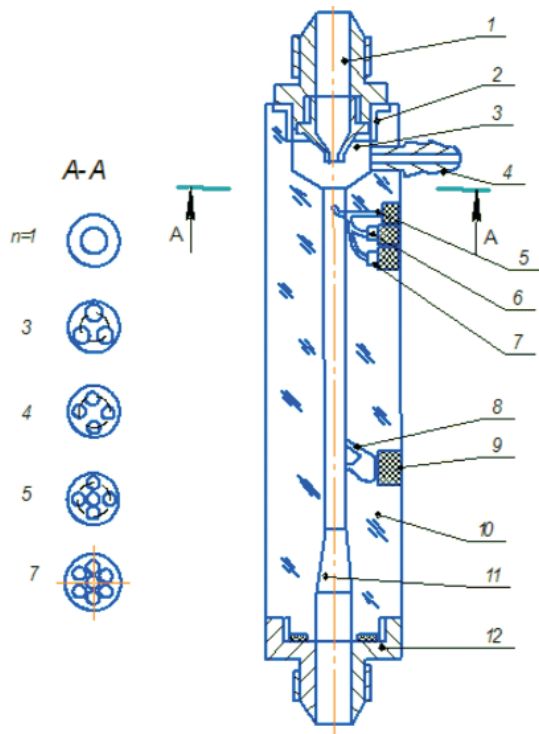
Процессы при сатурации безалкогольных напитков в струйном аппарате отличаются сложностью, наличием нескольких зон, зависимостью от многих факторов. Поэтому примем следующие упрощения для потоков в камере смешения.

Двухфазный поток в камере смешения делится на 2 участка: начальный и зону молочно-белой эмульсии. Длина начального участка известна и задается экспериментальными уравнениями.

По длине начального участка струя сохраняет циклическую форму, диаметр ее равен диаметру рабочего сопла.

1. Статическое давление постоянно по сечению камеры смешения.

Основные уравнения, которым подчиняется работа, струйного аппарата: законы сохранения массы, импульса и энергии.



Принципиальная схема струйного аппарата:

1 – входной штуцер; 2 – рабочее сопло;
3 – приемная камера; 4 – патрубок отвода
газа; 5 – игла шприца; 6 – газовая камера
сепаратора; 7 – жидкостная камера
сепаратора; 8 – капилляр для отвода газа;
9 – резиновая прокладка; 10 – корпус
струйного аппарата; 11 – диффузор;
12 – штуцер отвода насыщенной
рабочей жидкости

Запишем эти уравнения в дифференциальной форме.

2. Уравнения неразрывности [5]
для газовой фазы:

$$f_k \frac{d}{dl} \cdot \rho_r \cdot \varphi_r \cdot \omega_r = -K_v (c_{o_2}^* - c_{o_2}) \cdot f_k; \quad (4)$$

для жидкой фазы:

$$f_k \cdot \rho_p \frac{d}{dl} \cdot (1 - \varphi_r) \cdot \omega_p = K_v (c_{o_2}^* - c_{o_2}) \cdot f_k; \quad (5)$$

3. Уравнение сохранения импульса [5]:
для газовой фазы

$$\rho_r \cdot \varphi_r \cdot \omega_r \cdot \frac{d\omega_r}{dl} = -F - \varphi_r \frac{dP}{dl}; \quad (6)$$

для жидкой фазы:

$$K_v (c_{o_2}^* - c_{o_2}) (\omega_p - \omega_r) + \rho_p \cdot \omega_p (1 - \varphi_r) \frac{d\omega_p}{dl} = - (1 - \varphi_r) \frac{dP}{dl} + F, \quad (7)$$

где F – сила трения на поверхности раздела жидкостной струи и газовой фазы.

Скорость газовой фазы на выходе в камеру смешения определяется по уравнению

$$\omega_r = \omega_p u_o \frac{1}{m-1}. \quad (8)$$

Значение величины φ_r определяется по заданному значению основного геометрического параметра

$$\varphi_r = \frac{m-1}{m}. \quad (9)$$

Сила трения на поверхности раздела фаз, отнесенная к единице длины,

$$F = c_f \cdot \rho_r (\omega_p - \omega_r)^2 \cdot \pi \cdot d_p, \quad (10)$$

где c_f – коэффициент сопротивления.

Сила трения, отнесенная к единице объема [5]

$$F = c_f \cdot \rho_r (\omega_p - \omega_r) \cdot (1 - \varphi)^{0.5} / R_k. \quad (11)$$

Объемный коэффициент массопередачи можно определить по коэффициенту при спутном движении газа и струи рабочей жидкости:

$$K_v = 4 \cdot K \frac{(1 - \varphi)^{0.5}}{d_k}, \quad (12)$$

где K – коэффициент массопередачи при спутном движении газовой и жидкой фаз.

Коэффициент сопротивления c_f при спутном движении жидкостной и газовой струи определяется при числах Рейнольдса $Re < 5 \cdot 10^5$ по формуле Блазиуса [5]

$$c_f = 1,328 / \sqrt{Re_z}. \quad (13)$$

Число Рейнольдса подсчитывается по формуле

$$Re_z = \frac{(\omega_p - \omega_r) \cdot \rho_r \cdot Z}{\mu_r}, \quad (14)$$

где Z – расстояние от выходного сечения сопла до рассчитываемого. При числах Re больше $5 \cdot 10^5$

$$c_f = 0,0576 \cdot Re_z^{-0.2}. \quad (15)$$

Динамическая вязкость газов в области умеренных давлений не зависит от числа молекул в единице, то есть от давления [5] и является функцией температуры газа и может быть определена по формуле Сатерленда

$$\mu_r = \mu \frac{273,2 + C}{T + C} \left(\frac{T}{273,2} \right)^{3/2}, \quad (16)$$

где C – постоянная Сатерленда. Для умеренных температур можно принять

$$C = 184,5.$$

Значение динамической вязкости при умеренных давлениях и температуре 273,2 К

$$\mu = 1,39 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} = 13,65 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}.$$

Окончательное выражение для определения динамической вязкости углекислого газа имеет вид:

$$\mu_{O_2} = \frac{6,248 \cdot 10^{-3}}{457,6 + T} \cdot \left(1 + \frac{T}{273,2}\right)^{3/2} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}. \quad (17)$$

Закономерности течения двухфазной среды на начальном участке в камере смешения описываются системой дифференциальных уравнений (4), (5), (6), (7). Параметры потоков рассчитываются в пределах каждого шага Δl . Граничными условиями для расчета параметров потоков являются: $C_{O_2}^p$ – начальная концентрация газа в рабочей жидкости; P_n – давление газа в приемной камере; t_p – температура рабочей жидкости; t_n – температура газа в приемной камере; u_0 – коэффициент объемной подачи; m – значение основного геометрического параметра; P_p – давление подаваемой рабочей жидкости.

Расчет заканчивается в сечении начала распада струи. Значения параметров, получившиеся в результате расчета начального участка, являются входными данными для расчета параметров в области молочно-белой эмульсии.

Для расчета двухфазного потока в области молочно-белой эмульсии примем следующие упрощения:

1. Длина участка, на котором происходит распад струи в гомогенный поток, крайне незначительна и ею можно пренебречь.

2. Изменение структуры потока не сопровождается заметным растворением углекислого газа в рабочей жидкости.

Входными данными для расчета параметров в зоне гомогенного потока являются

данные последнего шага расчета начального участка.

На основании допущения об отсутствии массопередачи в сечении распада струи объемное газосодержание потока остается постоянным. Из уравнения сохранения импульса определим скорость двухфазного потока [5]:

$$\omega_{II-II} = x \cdot \omega_r' + (1+x) \cdot \omega_p', \quad (18)$$

где ω_{II-II} – скорость двухфазного потока после добавления струи; ω_r' , ω_p' – скорость соответственно потоков газа и рабочей жидкости в конце начального участка.

Уравнение неразрывности для двухфазного потока запишется в виде [5]:

$$m_r + m_p = \rho_{II-II} \cdot \omega_{II-II} \cdot f_k. \quad (19)$$

Отсюда

$$\rho_{II-II} = \frac{m_r + m_p}{f_k \cdot \omega_{II-II}}. \quad (20)$$

Плотность рабочей жидкости ρ_p значительно больше плотности углекислого газа и можно записать [5]:

$$\rho_{II-II} = (1 - \varphi_r) \cdot \rho_p. \quad (21)$$

Отсюда

$$\varphi = 1 - \frac{\rho_{II-II}}{\rho_p}. \quad (22)$$

Массовая концентрация газовой фазы за сечением распада [5]:

$$x_{II-II} = \frac{m_r}{m_r + m_p}. \quad (23)$$

По уравнениям (21), (22), (23) определяются плотность, объемное и массовое газосодержание в гомогенном потоке за сечением распада II–II.

Закон сохранения импульса напишется в виде [5]:

$$(m_p + m_r) \cdot \omega_1 + P_1 \cdot f_k = (m_p + m_r) \cdot \omega_2 + P_2 \cdot f_k - \tau_\omega \cdot \frac{\Pi}{f_k} \cdot l.$$

Дифференцируя это уравнение по dZ , получим [5]:

$$dP = - \left(\frac{m_p + m_r}{f_k} \right) \cdot d\omega + \frac{\Pi}{f_k} \cdot \tau_\omega \cdot dl, \quad (24)$$

где $\Pi = \pi \cdot d_k$ – параметр канала камеры смешения; m_p , m_r – соответственно массовые расходы жидкой и газовой фаз; τ_ω – касательное напряжение между двухфазным потоком и стенкой камеры вследствие сил трения.

Уравнение сохранения массы для гомогенного двухфазного потока в дифференциальной форме имеет вид [5]:

$$\frac{d\omega}{\omega} + \frac{d\rho}{\rho} = 0. \quad (25)$$

Дифференцируя уравнение (21) и подставляя полученное выражение в уравнения сохранения массы, получаем [5]:

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{d\varphi}{1 - \varphi}. \quad (26)$$

Подставляя формулу (26) в (24), получаем уравнение изменения давления

$$\frac{dP}{dZ} = - \frac{(m_p + m_r)^2}{f_k \cdot \rho_p (1-\varphi)^2} \cdot \frac{d\varphi}{dl} - \frac{\Pi}{f_k} \cdot \tau_k \quad (27)$$

Запишем соотношения масс газовой фаз [5]:

$$\rho \cdot x = \rho_r \cdot \varphi_r; \quad (28)$$

$$\rho(1-x) = \rho_p (1-\varphi). \quad (29)$$

Поделив эти уравнения, получаем [5]:

$$\frac{x}{1-x} = \frac{\rho'_r}{\rho_p} \cdot \frac{\varphi_r}{1-\varphi}. \quad (30)$$

Дифференцируя уравнения (30), получаем [5]:

$$\frac{dx}{x(1-x)} = \frac{d\rho_r}{\rho_r} + \frac{d\varphi}{(1-\varphi)\varphi}. \quad (31)$$

Количество тепла, выделяющегося в результате растворения газа в воде, крайне незначительно, и процесс можно считать изотермическим, то есть подчиняющимся закону изотермического сжатия

$$P_r \cdot \frac{1}{\rho_r} = \text{const}. \quad (32)$$

В дифференциальном виде уравнение изотермического сжатия имеет вид:

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\rho_r}{\rho_r}. \quad (33)$$

Подставляя это выражение в формулу (31), получаем:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\frac{(m_p + m_r)^2}{f_k^2 \cdot \rho_p (1-\varphi)} \cdot \frac{K_v (C_{o_2}^* - C_{o_2})}{w \cdot \rho_{r-II} \cdot (P/P_{II})} - \frac{\tau_\omega \cdot \Pi}{f_k}}{1 - \frac{(m_p + m_r)^2 \cdot \varphi}{f_p^2 \cdot \rho_p (1-\varphi) \cdot P}}. \quad (40)$$

Рассчитывая, что $\omega = \frac{m_p + m_r}{f_k^2 \cdot \rho_p (1-\varphi)}$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\frac{m_p + m_r}{f_k} \cdot L_M - \frac{\tau_\omega \cdot \Pi}{f_k}}{1 - \frac{(m_p + m_r) \cdot \omega \cdot \varphi}{f_r \cdot P}}, \quad (41)$$

где $L_M = \frac{K_v (C_{o_2}^* - C_{o_2})}{\rho_{r-II} \cdot (P/P_{II})}$ — множитель, учитывающий массопередачу в двухфазном потоке.

Таким образом, получаем систему дифференциальных уравнений, описывающих

$$\frac{dx}{x(1-x)} = \frac{dP}{P} + \frac{d\varphi}{(1-\varphi)\varphi}. \quad (34)$$

Скорость изменения массовой концентрации газа $\frac{dx}{x(1-x)}$ может быть определена из уравнения массопередачи

$$dm_r = -K_v \cdot (C_{o_2}^* - C_{o_2}) \cdot f_k \cdot dl; \quad (35)$$

$$dx = \frac{-K_v \cdot (C_{o_2}^* - C_{o_2})}{m_r + m_p} \cdot f_k \cdot dl. \quad (36)$$

Учитывая, что, $x = \frac{\varphi \cdot \rho_r}{\rho}$ получаем:

$$\frac{dx}{x} = - \frac{K_v \cdot (C_{o_2}^* - C_{o_2})}{w \cdot \rho_r \cdot \varphi} \cdot f_k \cdot dl. \quad (37)$$

Выражаем плотность газа из уравнения изотермы:

$$\rho_r = \frac{P_{r-II}}{P_{II}} \cdot P. \quad (38)$$

Подставляем это выражение в формулы (33) и (31)

$$\frac{dP}{P} = - \frac{d\varphi}{\varphi(1-\varphi)} - \frac{K_v (C_{o_2}^* - C_{o_2})}{\omega \cdot \rho_{r-II} \left(\frac{P}{P_{II}} \right) \cdot \varphi} \cdot dl. \quad (39)$$

Комбинируя это уравнение с уравнением (27), получаем зависимость давления от газосодержания в данном сечении:

процессы гидродинамики и массопередачи в области молочно-белой эмульсии:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{x(1-x)} &= \frac{dP}{P} + \frac{d\varphi}{\varphi_r(1-\varphi_r)} \\ \frac{dP}{dt} &= \frac{\frac{m_p + m_r}{f_k} \cdot L_M - \frac{\tau_\omega \cdot \Pi}{f_k}}{1 - \frac{(m_p + m_r) \cdot \omega \cdot \varphi}{f_p \cdot P}} \\ \frac{1}{x} \cdot \frac{dx}{dl} &= - \frac{K_v \cdot (C_{o_2}^* - C_{o_2})}{\omega \cdot \rho_r \cdot \varphi_r} \\ \rho_p (1-\varphi_r) \cdot f_k \cdot \omega &= \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Дополнительные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \rho &= \rho_p (1 - x) \\ \rho &= \frac{1}{\rho_r} = \text{const} \end{aligned} \right\}$$

Касательное напряжение трения двухфазного потока о стенки камеры определяется по формуле [5]:

$$\tau_w = \frac{0,085}{\text{Re}^{0,25}} \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \quad (43)$$

где

$$\text{Re} = \frac{4(m_p + m_r)}{\pi \cdot d_n \cdot \mu_p}. \quad (44)$$

Полученная модель позволяет адекватно описать массообменные процессы в струйных аппаратах.

Список литературы

1. Разработка способа приготовления бутилированной кислородонасыщенной воды и комплекса для его осуществления / А.А. Марков, С.В. Шахов, В.Е. Игнатов, Р.В. Шевляков // Современная российская наука глазами молодых исследователей: Сб. статей. (по итогам II Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов) Т.2. – Красноярск: Изд. Научно-инновационный центр, 2012. – С. 201–205.

2. Разработка установки приготовления кислородонасыщенной питьевой воды / А.А. Марков, Е.Д. Бурхан, В.Е. Игнатов, С.В. Шахов // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 6 – С. 142–142.

3. Пат. 2311849 Россия, МПК А 23 L 2/54 (2006.01), А 23 L 2/38 (2006.01). Способ приготовления бутилированной кислородонасыщенной воды и комплекс для его осуществления / Кленчищева С.И. № 2005139146/13; Заявл. 15.12.2005; Опубл. 10.12.2007.

4. Рид Р., Шервуд Б. Свойства газов и жидкостей (Определение и корреляция): пер. с англ., ред. В.Б. Когон, – Л.: Химия, 1971. – 704 с.

5. Циклаури Г.В., Данилин В.С., Селезнев Л.И. Адиабатные двухфазные течения– М.: Атомиздат, 1973. – 446 с.

References

1. Markov A.A., Shakhov S.V., Ignatov V.E., Sevlyakov R.V.: «Development of the method of the bottled oxygen saturated water preparation and complex its implementation // Modern Russian science through the eyes of young scientists: Sat. articles. (by the results of II All-Russian Scientific Conference Moody scientists and experts) Vol.2 / Atlanta: Ed. Research and Innovation Centre, 2012. pp. 201–205.

2. Markov A.A., Burkhan E.D., Ignatov V.E., Shakhov S.V., Designing the plant for manufacturing oxygen saturated drinking water// Successes of modern natural sciences. 2012. no. 6. pp. 142–142.

3. Patent 2311849 Russia? МПК А L 2/54 (2006.01), А 23 of L 2/38 (2006.01). The method of the bottled oxygen saturated water preparation and complex its implementation. Klenchishcheva Svetlana Ivanovna/ No. 2005139146/13; Demand 15.12.2005; Published 10.12.2007.

4. Reed R., Sherwood B. Properties of Gases and Liquids (Identification and correlation) Trans. Translated from English. Edition VB Kogon. L.: Chemistry, 1971. 704 p.

5. Tsiklauri G.V., Danilin V.S., Seleznev L.I. Adiabatic two-phase flows the Techa-Atomizdat, 1973. 446 p.

Рецензенты:

Глотова И.А., д.т.н., доцент, заведующая кафедрой технологии переработки животноводческой продукции Воронежского государственного агроуниверситета имени Императора Петра I, г. Воронеж;

Шашкин А.И., д.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой дифференциальных уравнений, декан факультета прикладной математики, информатики и механики ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный университет», г. Воронеж.

Работа поступила в редакцию 21.12.2012.