

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ В СТРУЙНОМ АППАРАТЕ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Б.С. САЖИН, М.П. ТЮРИН, Л.М. КОЧЕТОВ, Р.А. САФОНОВ, М.М. МАМОНОВА

(Московский государственный текстильный университет им. А.Н.Косыгина)

Рассмотренные ранее вопросы образования и разрушения эмульсий позволили разработать метод и установку для разделения агрегативно устойчивых эмульсий с использованием струйного аппарата. Механизм образования агрегативно-устойчивых эмульсий и прямого, и обратного типа в настоящее время нельзя считать окончательно выясненным. Существует ряд общих теорий, объясняющих возникновение агрегативной устойчивости эмульсионных систем. Эти теории едины в том, что для придания агрегативной устойчивости эмульсионной системе, состоящей из двух чистых, несмешивающихся жидкостей (межфазное натяжение которых много больше нуля), необходимо присутствие

третьего стабилизирующего компонента, способствующего образованию бронирующих оболочек, то есть прочной гидрофобной пленки на поверхности глобул, что обуславливает агрегативную устойчивость эмульсионных систем.

Ниже представлены результаты аналитических исследований гидродинамики в струйных аппаратах для регенерации исходных продуктов, содержащихся в устойчивых эмульсиях.

При моделировании турбулентности использовалась гипотеза Буссинеска, связывающая турбулентные напряжения с осредненными градиентами скоростей турбулентного потока:

$$\theta_{T(ij)} = -\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_T \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_T \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (1)$$

которая позволяет исследовать гидродинамические характеристики аппарата.

На основании данной гипотезы получено математическое описание турбулентно-

го движения для осесимметричного случая, которое дополнено уравнением неразрывности для неустановившегося движения:

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_x) = \\ & = -\frac{dp}{dx} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r(\mu + \mu_T) 2 \frac{\partial v_x}{\partial x} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial x} \right) \right], \\ & \frac{\partial}{\partial \tau} (\rho v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r \rho v_x v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho v_r v_r) = \\ & = -\frac{dp}{dr} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left[ r(\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial v_r}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(\mu + \mu_T) 2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] - 2\mu \frac{v_r}{r^2}, \\ & \frac{\partial r}{\partial \tau} + \operatorname{div} \rho \vec{v} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $v_x$  – скорость потока вдоль оси X;  $v_r$  – скорость потока в радиальном направлении;  $\rho$  – плотность смеси;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $\mu_T$  – коэффициент турбулентной вязкости;  $p$  – давление;  $\vec{v}$  – вектор скорости;  $\tau$  – время.

Эти уравнения записаны при условии, что осредненная угловая скорость  $v_\varphi = 0$ , так как в данном случае отсутствует вращение потока вокруг оси X.

Уравнения (2) описывают движение смеси: устойчивой эмульсии, воды и конечного продукта, а также компоненты, получаемой в результате смешения этих веществ.

Для системы уравнений (2) использовались следующие граничные условия:

– постоянство задаваемой скорости пассивного потока (устойчивая загрязненная эмульсия) на входе в камеру смешения:  $v_{yэ} = \text{const}$ ;

– уравнение турбулентной кинетической энергии:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r k) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x k) = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(\mu + \mu_T) \frac{\partial k}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon + Y_M, \end{aligned} \quad (3)$$

– уравнение скорости диссипации:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho v_r \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x \varepsilon) = \\ & = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r(\mu + \mu_T) \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ (\mu + \mu_T) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $G_k$  – производство турбулентной кинетической энергии, вызванное градиентами осредненного потока;  $G_b$  – производство турбулентной кинетической энергии, вызванное плавучестью;  $Y_M$  – параметр, характеризующий пульсации, вызванные расширением в сжимаемых турбулентных потоках;  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $C_{3\varepsilon}$  – эмпирические константы модели.

– постоянство задаваемой скорости активного потока (вода) при выходе из сопла:  $v_b = \text{const}$ ;

–отсутствие кавитации;

– равенство нулю скоростей активного ( $v_{(гр)в}$ ) и пассивного ( $v_{(гр)уэ}$ ) потоков, а также смеси ( $v_{(гр)см}$ ) на стенке струйного устройства по всей его длине (условие прилипания)  $v_{(гр)уэ} = v_{(гр)в} = v_{(гр)см} = 0$ .

Для моделирования турбулентности использовалась k-ε модель, для нее решается два дополнительных уравнения переноса: для определения k – турбулентной кинетической энергии и ε – турбулентной энергии диссипации. Расчет проводится в цилиндрических координатах с использованием значений компонент скоростей  $v_x$  и  $v_r$ , а также давления, получаемых из (2):

При этом предполагается изотропность турбулентной вязкости. Коэффициент турбулентной вязкости, являющийся характеристикой потока, вычисляется по формуле Колмогорова-Прандтля как функция параметров турбулентности – кинетической энергии и скорости ее диссипации:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5)$$

При моделировании процесса взаимодействия веществ в струйном аппарате принималось, что этот процесс является результатом определенной ниже структурной реакции (образования конечного продукта в результате механического взаимодействия исходных веществ):

$$v_{y_3} + v_B + v_{кп}, \quad (6)$$

где  $v_{y_3}$ ,  $v_B$ ,  $v_{кп}$ , – стехиометрические коэффициенты структурной реакции устой-

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho Y_b) + \nabla(\rho \vec{v} Y_b) &= \nabla \left[ \left( \rho D_b = \frac{\mu_T}{S_{ст}} \right) \nabla Y_b \right] - G_b, \\ \frac{\partial}{\partial \tau}(\rho Y_{кп}) + \nabla(\rho \vec{v} Y_{кп}) &= \nabla \left[ \left( \rho D_{кп} = \frac{\mu_T}{S_{кп}} \right) \nabla Y_{кп} \right] + G_{кп}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $Y_B = \frac{\rho_B}{\rho_B + \rho_{y_3} + \rho_{кп}}$  – массовая доля

воды;  $Y_{y_3} = \frac{\rho_{y_3}}{\rho_B + \rho_{y_3} + \rho_{кп}}$  – массовая доля

устойчивой эмульсии;  $S_{кп}$  – турбулентное число Шмидта (принимается равным 0,7);  $D_B$  и  $D_{кп}$  – коэффициенты молекулярной диффузии воды и конечного продукта соответственно.

$G_B = v_B M_B \hat{R}$  – скорость вступления в структурную реакцию воды в единице объема;  $G_{кп} = v_{кп} M_{кп} \hat{R}$  – скорость вступления в структурную реакцию смеси веществ в единице объема;  $M_B$  и  $M_{кп}$  – молярная масса воды и смеси веществ;  $\hat{R}$  – условная скорость:

$$\hat{R} = A \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( \frac{Y_j}{v_j M_j} \right), \quad (8)$$

где  $A$  – эмпирическая константа, равная 4;  $j$  – индекс, определяющий вид компоненты, участвующей в структурной реакции;

живой эмульсии, воды и получаемой смеси веществ (задаются в зависимости от долей компонент, подаваемых в струйный аппарат).

Основной компонентой, участвующей во взаимодействии всех веществ, вступающих в структурную реакцию, является устойчивая эмульсия. Описание этого взаимодействия осуществляется уравнениями турбулентной диффузии. С учетом (3), (4) а также структурной реакции, уравнения турбулентной диффузии:

$\rho = \rho_{y_3}(1 - Y_p - Y_{кп}) + \rho_B Y_B + \rho_{кп} Y_{кп}$  – плотность смеси компонент.

Математическая модель гидродинамических течений и взаимодействий в струйном аппарате позволила получить распределение давлений и скоростей, изменение скоростей турбулентных пульсаций и турбулентной вязкости в струйном аппарате, векторы скоростей и изменение статического давления по ее длине.

На рис. 1 (изолинии основных характеристик пассивного и активного потоков, где а) – изолинии массовой доли конечного продукта; б) – изолинии интенсивности турбулентных пульсаций  $\overline{u_i u_j}$ ; в) – линии тока) приведены распределения основных характеристик пассивных и активных потоков. Как видно из рисунка, в различных частях струйного аппарата наблюдается сложная картина течения. Происходит нарастание интенсивности перемешивания и взаимодействия потоков по длине камеры смешения, необходимое для разрушения устойчивых эмульсий (рис. 1-а).

Физические процессы смешения активного и пассивного потоков в струйном аппарате на начальном участке подобны

процессам распространения затопленной турбулентной струи в неограниченном объеме. На границах этой струи образуется обширная зона турбулентного взаимодействия активного и пассивного потоков (рис. 1-б); изменения интенсивности турбулентных пульсаций до  $5000 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . По мере преобразования кинетической энергии струи в энергию давления поле скоростей становится все более равномерным, и в диффузоре давление струи преобразуется до противодействия за эжектором, то есть происходит затухание процессов, необходимое для окончательной коалесценции разложившихся составляющих эмульсии (рис. 1-в).

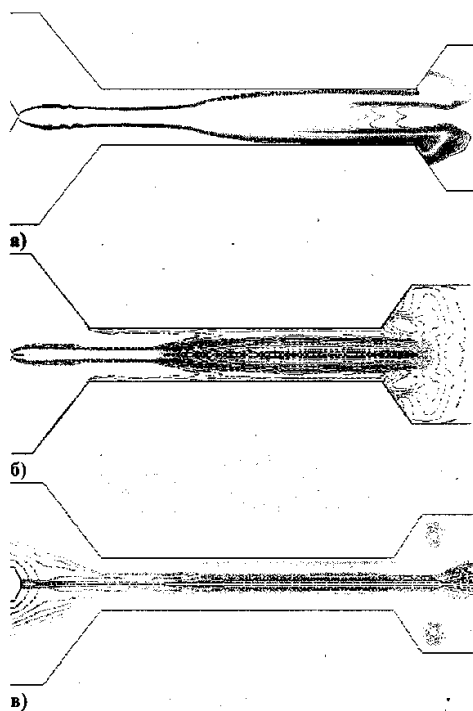


Рис.1

Кроме того, на основе математической модели получен диапазон, в котором должна находиться длина камеры смешения струйного аппарата, составляющая  $9 \div 12$  диаметров камеры смешения (точное значение определяется исходя из состава

эмульсии). Именно такая длина камеры смешения обеспечивает разрушение бронирующих оболочек капель воды с целью ее последующей коалесценции в транспортировочном трубопроводе и расслоение компонентов разрушенной эмульсии в отстойной аппаратуре.

## ВЫВОДЫ

1. Рассмотрены процессы разрушения бронирующих оболочек и коалесценции глобул жидкости устойчивых эмульсий.
2. Предложена математическая модель гидродинамических процессов, протекающих в струйном аппарате, предназначенном для разделения устойчивых эмульсий.
3. На основании предложенной математической модели получены основные геометрические характеристики струйного аппарата для разделения устойчивых эмульсий.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Сошенко М.В. и др. Процессы разрушения устойчивых эмульсий в струйном аппарате // Сб. МКХТ: Успехи в химии и химической технологии. – М., 2006. Т. XX. № 6 (64).
2. Тюрин М.П., Сошенко М.В., Сафонов Р.А., Мамонова М.М. Исследование процессов разделения устойчивых эмульсий в многофункциональном струйном аппарате с регулируемой гидродинамикой // Мат. научн.-техн. конф.: Современные технологии и оборудование текстильной промышленности (Текстиль-2006), М.: МГТУ им. А.Н.Косыгина, 2006.
3. Сажин Б.С., Кочетов Л.М., Сафонов Р.А., Сошенко М.В. Исследования процессов разрушения устойчивых эмульсий и коалесценции капель жидкости // Сб. ст. Межд. научн.-техн. конф.: Экологические и ресурсосберегающие технологии промышленного производства. – Витебск, 2006.

Рекомендована кафедрой процессов и аппаратов химической технологии и безопасности жизнедеятельности. Поступила 14.04.08.