

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАСЫЩЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПУЗЫРЕЙ ПАРАМИ ЖИДКОСТИ В БАРБОТАЖНОЙ КОЛОННЕ

*Приведены физическая и математическая модели теплообменных процессов при насыщении газовых пузырей парами жидкости при барботаже через эту жидкость газа. Основной задачей моделирования является определение временной зависимости объемной концентрации паров жидкости в парогазовой смеси на выходе из барботажного устройства. Созданная методика расчета апробирована при проектировании и испытании барботажного устройства для создания воздухобензиновой смеси, используемой в лабораторной установке, предназначенной для улавливания паров бензина на автозаправочной станции. Проведен анализ сравнения расчетных и экспериментальных данных.*

**E-mail:** lavrov@power.bmstu.ru

**Ключевые слова:** газ, жидкость, барботаж, теплообмен, массообмен.

При моделировании массообмена в слое жидкости, в которой всплывают газовые пузыри, принимаются следующие допущения: газ и жидкость не вступают между собой в химическую реакцию; влияние гидростатического давления не учитывается; свободное всплытие пузыря в слое жидкости происходит при равенстве сил Архимеда и гидравлического сопротивления; параметры жидкости и газа меняются только в вертикальном направлении; все пузыри имеют одинаковые размеры в горизонтальном сечении; свойства газа принимаются идеальными.

При всплытии газовых пузырей через слой жидкости происходят два процесса: растворение газа из пузыря в жидкость и обратная диффузия паров жидкости в пузырь. Движущей силой этих процессов является разность предельной и текущей концентраций паров жидкости в пузыре и растворенного газа в жидкости. Изменение во времени  $t_{\text{в}}$  числа молей  $\nu_{\text{п}}$  испарившейся жидкости в газовом пузыре и эффективного радиуса  $r$  пузыря при его всплытии определяется следующей системой дифференциальных уравнений согласно [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d\nu_{\text{п}}}{dt_{\text{в}}} &= 4\alpha_{\text{ф}}\pi r^2 k_{\text{п}}(y_{\text{н}} - y_{\text{п}}) \frac{p}{RT}; \\ \frac{dr}{dt_{\text{в}}} &= \alpha_{\text{ф}} \left[ (k_{\text{ж}}(C - C_{\text{max}}) \frac{\rho_{\text{ж}} m_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}} m_{\text{ж}}} + k_{\text{п}}(y_{\text{н}} - y_{\text{п}}) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{ф}} = \frac{S_{\text{д}}}{4\pi r^2_{\text{п}}}$  — коэффициент формы пузыря, учитывающий отклонение действительной площади поверхности пузыря от сферической

поверхности, образованной эффективным радиусом пузыря ( $S_d$  — действительная площадь поверхности пузыря);  $k_{\text{п}}$  и  $k_{\text{ж}}$  — коэффициенты удельной объемной массопередачи для диффузии газа при испарении паров жидкости в пузырь и в жидкость;  $y_{\text{п}}$  и  $y_{\text{н}}$  — текущая мольная доля паров жидкости в пузыре и при насыщении для данной температуры  $T$  процесса;  $R = 8314$  Дж/(кг·К) — универсальная газовая постоянная;  $C$  и  $C_{\text{max}}$  — текущая и предельная мольные доли газа, растворенного в жидкости, определяемые по закону Генри [3]:

$$C_{\text{max}} = \frac{py}{H},$$

$H$  — постоянная Генри для растворения газа в жидкости;  $p$  — полное давление в пузыре;

$$y = \frac{\nu_{\text{г}} m_{\text{г}} \rho_{\text{п}}}{\nu_{\text{г}} m_{\text{г}} \rho_{\text{п}} + \nu_{\text{п}} m_{\text{ж}} \rho_{\text{г}}}$$

— объемная концентрация газа в пузыре;  $\nu_{\text{г}}$  и  $\nu_{\text{п}}$  — число молей газа и пара в пузыре в данный момент времени;  $\rho_{\text{п}}$  и  $\rho_{\text{г}}$  — плотности пара и газа в пузыре;  $m_{\text{г}}$  — молярная масса газа;  $m_{\text{ж}}$  — молярная масса жидкости.

Система уравнений (1) дополняется начальными условиями: начальным числом молей испарившейся жидкости в газовом пузыре и начальным значением эффективного радиуса пузыря в момент времени  $t_{\text{в}} = 0$ :

$$\begin{aligned} \nu_{\text{п}}|_{t_{\text{в}}=0} &= 0; \\ r|_{t_{\text{в}}=0} &= r_0. \end{aligned} \quad (2)$$

Время процесса массообмена при всплытии пузырей изменяется от нуля до времени полного всплытия  $t_{\text{вс}}$ , определяемого значением высоты  $h$  слоя жидкости и скоростью всплытия пузыря  $w_{\text{вс}}$ :

$$h = \int_0^{t_{\text{вс}}} w_{\text{вс}} dt. \quad (3)$$

Созданная методика была апробирована при проектировании и испытании барботажного устройства для создания воздухобензиновой смеси, используемой в лабораторной установке, предназначенной для улавливания паров бензина на автозаправочной станции [4]. Барботажное устройство представляет собой стальной цилиндрический сосуд, с наружным диаметром 400 мм, высотой 700 мм, со стенками толщиной 5 мм, в котором находится жидкий бензин. Снизу подается воздух через отверстия диаметром 1 мм, сверху отводится образовавшаяся паровоздушная смесь (рис. 1). При испарении бензина в воздушные пузыри температура понижается, что вызывает уменьшение равновесного содержания паров бензина в воздушных пузырях, поэтому для

поддержания постоянной температуры барботажное устройство было снабжено нагревателем, поддерживающим постоянную температуру в течение работы. Основной задачей моделирования является определение временной зависимости объемной концентрации паров бензина в воздухобензиновой смеси на выходе из барботажного устройства:

$$C_k = \frac{\nu_6^k}{\nu_6^k + \nu_B^k},$$

где  $\nu_6^k$ ,  $\nu_B^k$  — конечное число молей паров бензина и воздуха в пузырье, покидающем барботажное устройство. Величина  $C_k$  зависит, прежде всего, от уровня жидкого бензина ( $h$ ) в барботажном устройстве, от которого зависит время всплытия газового пузыря и, следовательно, продолжительность процесса массообмена при испарении бензина в воздушные пузыри. Уровень  $h$  определяется не только количеством жидкого бензина, но и количеством находящихся в жидком бензине воздушных пузырей:

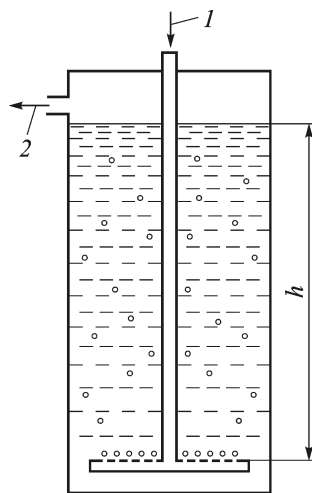
$$h = (M/\rho_6 + \dot{V}t_{bc})/S,$$

где  $\rho_6$  — плотность бензина;  $\dot{V}$  — объемный расход воздуха;  $S$  — площадь сечения барботажного устройства;  $M$  — масса бензина, находящегося в барботажном устройстве в данный момент времени  $t$ ,

$$M = M_0 + \int_0^t \nu_6^k \frac{3\dot{V}}{4\pi r_0^3} dt$$

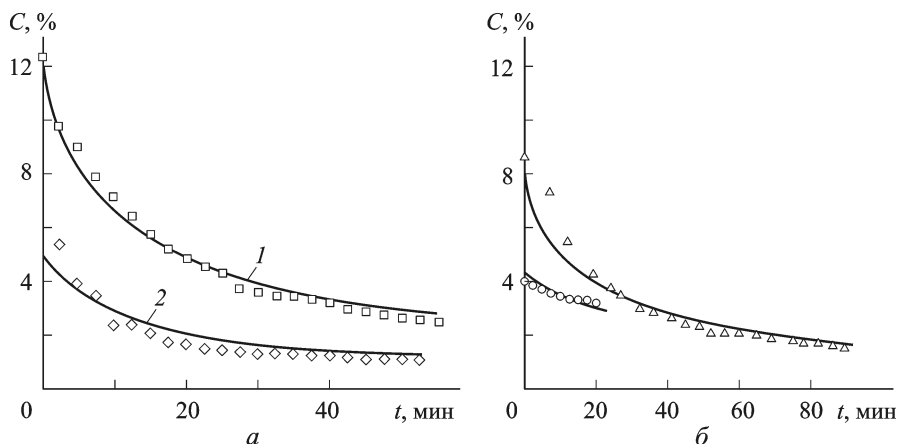
( $M_0$  — начальная масса бензина в барботажном устройстве).

На рис. 2 приведены временные зависимости концентрации воздухобензиновой смеси на выходе из барботажного устройства, полученные экспериментальным путем, и соответствующие им расчетные значения, полученные по предложенной методике, для разных значений объемного расхода воздуха и средней температуры процесса 24 °С. Некоторое несовпадение экспериментальных и расчетных данных наблюдается в начале и конце рассматриваемого процесса. Это можно объяснить следующими причинами. В начале процесса воздух начинает интенсивно растворяться в жидком бензине, и поэтому количество воздуха в пузырьях будет уменьшаться, что приводит к увеличению реальной концентрации паров бензина по сравнению с расчетной по предложенной модели. В конце процесса уровень жидкого бензина



**Рис. 1. Схема барботажного устройства:**

1, 2 — вход и выход воздушного потока



**Рис. 2. Временная зависимость концентрации паров бензина в выходящем паровоздушном потоке для разных расходов подаваемого воздушного потока (а) и разных уровнях жидкого бензина (б):**

1, 2 — расчетные значения; □ и ◇ (при  $9 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), △ и ○ (при  $5,5 \text{ м}^3/\text{ч}$  и  $4,4 \text{ м}^3/\text{ч}$ ) — экспериментальные значения

уменьшается и в нем увеличивается относительный объем газовых пузырей при неизменяющемся объемном расходе подаваемого воздуха. При этом пузыри могут сливаться друг с другом, что приводит к уменьшению поверхности контакта между жидкостью и газом и, следовательно, уменьшению массопередачи. Поэтому расчетная концентрация паров бензина в пузырях будет выше реальной.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лавров Н. А., Скорнякова Е. А. Метод оценки временных характеристик процессов очистки сжиженного газа от растворенного в нем газа при барботировании // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2010. – № 2. – С. 16–18.
2. Лавров Н. А., Скорнякова Е. А. Моделирование процессов очистки жидкости от растворенного в ней газа при барботаже // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2010. – Спец. выпуск “Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения”. – С. 155–160.
3. Перри Д ж. Справочник инженера-химика. Т. 1. / Пер. с англ. – Л.: Химия, 1969. – 610 с.
4. Александров А. А. Разработка метода и средств повышения безопасности в чрезвычайных ситуациях при хранении жидкого углеводородного топлива на основе обратной конденсации паров: Дисс. . . канд. техн. наук. Новгородск, 2004. – 113 с.

Статья поступила в редакцию 27.06.2012