

Семёнов Иван Александрович,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: semenov_ia82@mail.ru

Черниговская Марина Алексеевна,

к.т.н., доцент, Ангарский государственный технический университет,

e-mail: pm888@mail.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАССООТДАЧИ ОТ КОЛЕБЛЮЩЕЙСЯ ТВЕРДОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Semenov I.A., Chernigovskaya M.A.

MATH SIMULATION OF MASS TRANSFER FROM VIBRATING SURFACE

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования процесса массоотдачи от колеблющейся твердой поверхности конической формы в поток воздуха. Рассмотрено влияние на кинетику процесса таких параметров как частота, амплитуда колебаний, размеры конуса и коэффициент диффузии. Получено критериальное уравнение, позволяющее выполнить расчет коэффициента массоотдачи для ряда подобных процессов.

Ключевые слова: колебания, вибрация, массоотдача, массообмен, моделирование, частота, амплитуда.

Abstract. Results of modeling of mass transfer from a vibrating cone are given in the paper. Effect of such parameters as frequency, amplitude, height of the cone and diffusion coefficient on mass transfer rate is considered. An equation for calculation of mass transfer coefficient is obtained for similar processes.

Keywords: vibration, mass transfer, modeling, frequency, amplitude.

Процессы тепло- и массообмена между твердой поверхностью и текучей средой широко представлены на практике в различных отраслях промышленности. Поэтому вопросы, связанные с интенсификацией данных процессов и повышением эффективности работы оборудования, неизменно остаются актуальными и по сей день [1].

Кинетика тепло- и массопереноса определяется степенью турбулизации прилегающих к твердой поверхности слоев жидкости или газа. Одним из способов создания или интенсификации течений среды в приграничных слоях может являться организация колебаний твердой поверхности, что позволяет существенно повысить эффективность переноса тепла и вещества.

В работе [2] показано, что при создании колебаний плоской поверхности в жидкости образуются течения, направленные от колеблющейся поверхности и способные переносить с собой тепло и диффундирующее вещество. При этом было показано, что данные течения возникают лишь в случае преодоления некоторого критического уровня колебаний.

На основе экспериментальных исследований в работах [3-5] было изучено влияние колебаний плоской поверхности на массообмен в жидкой и газообразной средах. Было показано, что вибрации в диапазоне частот от 25 Гц до 200 Гц позволяют существенно повысить скорость массопереноса.

Следует отметить, что экспериментальные исследования процесса тепло- и массообмена от колеблющейся поверхности имеют ограниченную точность, связанную с техническим несовершенством лабораторных установок. Кроме того, в ходе экспериментов крайне затруднительно изучить состояние слоев жидкости или газа, непосредственно прилегающих к колеблющейся поверхности.

В настоящее время в связи с ростом вычислительной мощности компьютерной техники все более распространенными становятся расчеты гидродинамических процессов на основе конечно-разностных моделей. Выполненное на их основе моделирование процесса позволяет существенным образом дополнить экспериментальные исследования и повысить точность получаемых при этом результатов.

В представленной работе было выполнено моделирование процесса массоотдачи от поверхности вибрирующего конуса в поток воздуха с целью изучения влияния его основных параметров на кинетику массопереноса. Исследование было выполнено на базе математической модели, построенной в пакете программ Ansys. Для этого при помощи модулей DesignModeler и Meshing была построена конечно-разностная сетка в осесимметричных координатах.

Сетка была составлена из 10665 нерегулярных элементов со сгущением в области, прилегающей к вибрирующей поверхности. Шаг сетки вблизи поверхности при этом составил 0,2 мм. В качестве оси симметрии была выбрана ось абсцисс.

Моделирование возникающих при колебаниях конуса гидродинамических течений и процесса массоотдачи выполнялось в модуле Fluent. В качестве свойств среды были приняты параметры воздуха с плотностью, равной $1,082 \text{ кг/м}^3$, и динамической вязкостью $1,88 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$. В модели при этом рассматривался вариант с набегающим на вибрирующую поверхность ламинарным потоком воздуха со скоростью 0,019 м/с. На поверхности конуса было задано нестационарное граничное условие в виде гармонической функции аксиальной скорости по времени $w = f(t)$. В качестве диффундирующего вещества использовался нафталин с концентрацией насыщенных паров на вибрирующей поверхности, равной 0,324 % масс.

В ходе исследований выполнялись расчеты массы нафталина, переходящего от вибрирующей поверхности в объем среды, при различных параметрах вибраций: частоте f и амплитуде A . Также была выполнена оценка влияния на кинетику массоотдачи высоты вибрирующего конуса h .

В начальный момент времени концентрация паров нафталина в воздухе была равна нулю, а скорость воздуха во всем объеме составляла 0,019 м/с. Для моделирования нестационарного процесса временной шаг устанавливался в зависимости от рассматриваемой частоты колебаний поверхности и рассчитывался как $1/50$ от периода колебаний.

В ходе расчетов выполнялась оценка количества накопленного в объеме нафталина и его расхода через сечение на свободной границе модели. Это позволило определить усредненный поток вещества от вибрирующей поверхности в поток воздуха, который рассчитывался по формуле:

$$M = \left[\int_V (y_{t_2} - y_{t_1}) \rho dV + \int_{t_1}^{t_2} \int_{S_{out}} \rho w_{out} y_{out} dS dt \right] / (t_2 - t_1), \quad (1)$$

где M – средний массовый расход нафталина от вибрирующей поверхности в поток воздуха за период времени с t_1 по t_2 , кг/с; y_{t_1} и y_{t_2} – массовая доля нафталина в объеме воздуха в моменты времени t_1 и t_2 , соответственно, масс. дол.; ρ – плотность воздуха, кг/м³; w_{out} – скорость среды на свободной границе модели в момент времени t , м/с; y_{out} – массовая доля нафталина в среде на свободной границе модели в момент времени t , масс. дол.; V – объем расчетной среды, м³; S_{out} – площадь сечения среды на свободной границе модели, м².

Расчеты показали, что в начальный период времени, близкий к $t = 0$, в объеме V происходило резкое повышение концентрации нафталина. Однако с течением времени средняя скорость увеличения концентрации уменьшалась, приближаясь к некоторому постоянному значению.

Анализ полученных результатов показал, что для всех рассматриваемых случаев с момента времени t_1 , равного не менее 50 периодам колебаний, и условии $t_2 > t_1$ средний поток M , рассчитываемый по уравнению (1), стремился к некоторому установившемуся значению. При времени t_2 , равном 100 периодам колебаний, усредненный поток M можно было считать стабилизировавшимся, а его величину принять в качестве характерного потока вещества от вибрирующей поверхности при рассматриваемых параметрах процесса. Найденные значения массовых потоков позволили вычислить среднюю по колеблющейся поверхности и времени величину β согласно выражению:

$$\beta = M / [F \rho (y_s - y_{in})], \quad (2)$$

где F – площадь вибрирующей конусной поверхности, м²; y_s и y_{in} – концентрация нафталина на границе колеблющейся поверхности и в набегающем на конус потоке воздуха, масс. дол.

Концентрации y_s и y_{in} по своей сути являются граничными условиями для данной задачи, поэтому во всех расчетах они оставались постоянными. Величина y_s при этом представляла концентрацию насыщенных паров нафталина, которая для условий моделирования составляла $3,24 \cdot 10^{-3}$ масс. дол., а концентрация набегающего потока y_{in} равнялась нулю.

В ходе исследований было выполнено моделирование процесса при четырех значениях частот колебаний конуса f : 25 Гц, 50 Гц, 75 Гц и 100 Гц. Результаты влияния частоты колебаний на коэффициент массоотдачи при прочих равных условиях представлены на рисунке 1а. На рисунке 1б приведены результаты моделирования процесса при четырех значениях амплитуд колебаний.

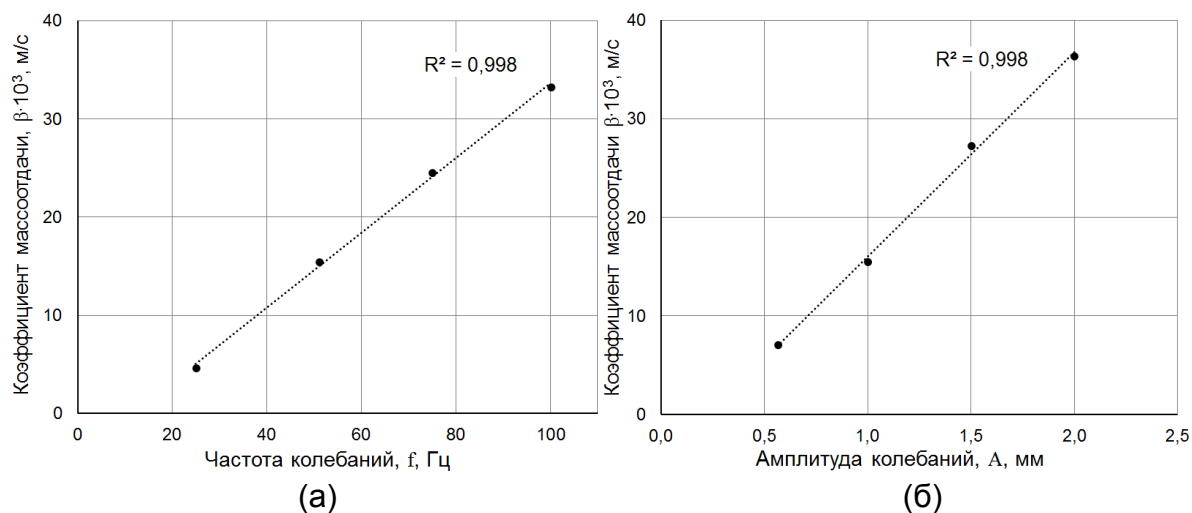


Рисунок 1 – Влияние частоты f (а) и амплитуды колебаний A (б) на коэффициент массоотдачи β

Видно, что полученные зависимости (рис. 1 а, б) имеют линейный характер, а коэффициент массоотдачи находится в прямой зависимости от таких параметров колебаний, как частота и амплитуда.

Для описания влияния высоты конуса на эффективность процесса в качестве аргумента функции была использована величина $(1-h/d)$, где h – высота колеблющегося конуса, мм; d – диаметр конуса, мм. На рисунке 2 представлена зависимость коэффициента массоотдачи от данной величины, которая показывает, что увеличение высоты конуса приводит к ухудшению массообмена.

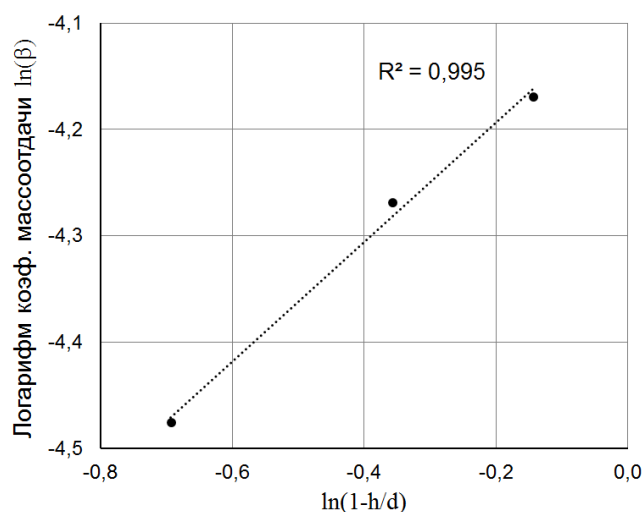


Рисунок 2 – Влияние высоты конуса h на коэффициент массоотдачи β

С целью распространение результатов моделирования на подобные процессы, на основе полученных данных были рассчитаны комплексы и симплексы подобия. Для описания гидродинамического режима, возникающего в процессе колебаний, при этом был использован критерий Рейнольдса следующего вида:

$$Re = fA^2/\nu,$$

где ν – кинематическая вязкость среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Произведение fA , входящее в данное выражение, характеризует величину колебательной скорости поверхности массообмена. Согласно результатам, полученным в работах [3-5], в качестве характерного размера для описания подобных процессов была принята амплитуда колебаний A .

Статистическая обработка результатов моделирования позволила получить следующую критериальную зависимость:

$$Sh = 0,264Re^{1,17\pm 0,08} Sc^{0,94\pm 0,04} (1 - h/d)^{0,34\pm 0,3}, \quad (3)$$

где $Sh = \beta A/D$ – критерий Шервуда; $Sc = \nu/D$ – критерий Шмидта.

Коэффициент детерминации R^2 выражения (3) составляет 0,99, что свидетельствует об адекватности выполненного статистического описания. Учитывая подобие процессов тепло- и массопереноса, полученная в ходе исследований критериальная зависимость в полной степени может быть использована для расчета эффективности теплообмена от вибрирующей конической поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. Пер. с англ. М.: Химия, 1982. – 696 с.
2. Семёнов И.А., Ульянов Б.А., Кулов Н.Н. Исследование течений жидкости, возникающих при вибрациях плоской поверхности // Теоретические основы химической технологии. 2013. Т. 47. № 4. С. 379-385.
3. Семёнов И.А., Ульянов Б.А., Кулов Н.Н. Экспериментальная оценка влияния колебаний на скорость массоотдачи от плоской поверхности // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 3. С. 239-244.
4. Семёнов И.А., Ульянов Б.А., Фереферов М.Ю., Кулов Н.Н. Влияние вибраций твердой поверхности на процесс массоотдачи // Теоретические основы химической технологии. 2017. Т. 51. № 5. С. 485-490.
5. Семёнов И.А., Фереферов М.Ю., Ульянов Б.А., Черниговская М.А., Кулов Н.Н. Влияние параметров колеблющейся поверхности и диффузионных свойств среды на кинетику массообмена // Теоретические основы химической технологии. 2018. Т. 52. № 2. С. 150-156.