

ВИБРАЦИОННЫЕ МЕХАНИЗМЫ ТРАНСПОРТА ПРИМЕСИ В КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМАХ

В. А. Демин, Ю. Н. Мухайлова

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

В работе представлен вывод уравнений вибрационно-концентрационной конвекции для жидкости в случае зависимости коэффициента диффузии от концентрации. Численно методом конечных разностей решена задача об эволюции полей концентрации и функции тока для плоского слоя. Оказалось, что высокочастотные вибрации полости способны вызывать осредненное конвективное течение даже в отсутствие нагрева и поля тяжести. При этом течение имеет валиковый характер. По результатам прямого численного моделирования выявлены наиболее эффективные способы усиления или наоборот подавления процесса вымывания примеси в объем с одной из твердых границ слоя. Показано, что в зависимости от угла наклона оси вибраций процесс перераспределения примеси происходит с разной интенсивностью осредненного вибрационно-концентрационного течения в жидкости. Наиболее интенсивное вымывание примеси с твердой границы слоя происходит при касательных вибрациях.

Ключевые слова: вибрационно-концентрационная конвекция, вымывание примеси

VIBRATIONAL MECHANISMS OF ADMIXTURE TRANSPORT IN CONVECTIVE SYSTEMS

V. A. Demin, Y. N. Mukhailova

Perm State University, Bukireva St. 15, 614990, Perm

The equations of vibrational convection have been derived for fluids when the diffusion coefficient depends on concentration. The problem of the evolution of concentration field and the stream function for a plane layer has been solved numerically by the method of finite differences. It has been found that the high-frequency vibrations in a cavity can induce mean convective flow even in the absence of the heat inhomogeneity and gravity field. In this case the flow has the rolls nature. The results of direct numerical simulation reveal the most effective ways of intensification or suppression of the ablation process of the admixture from one of the solid boundaries of the layer into the volume. It is shown that, depending on the inclination angle of the vibration axis, the process of the impurity redistribution occurs with different intensities of the averaged vibrational flow in the liquid. The most intensive washout of the impurity from the solid boundary layer occurs for tangential vibrations.

Keywords: vibrational convection, fluid molecular mixtures, ablation process

1. Уравнения концентрационной конвекции

Высокочастотные колебания полости, целиком заполненной жидкостью, при наличии температурной неоднородности могут вызывать регулярные осредненные течения. Этот результат действия вибраций принято называть явлением термовибрационной конвекции [1]. Экспериментально

термовибрационная конвекция горизонтального слоя жидкости с твердыми границами при воздействии высокочастотных вибраций, наклоненных под произвольным углом к слою, была изучена в [2]. Для концентрационных задач при наличии конвективного переноса и высокочастотных вибраций может быть применен метод осреднения [3]. Эту процедуру реализуем в отношении полных уравнений концентрационной конвекции при наличии вибрационной силы. Пусть коэффициент диффузии зависит от концентрации по простейшему закону $D(C) = D_0(1 + \alpha C)$. Здесь D_0 – коэффициент диффузии при малых значениях концентрации примеси, α – размерный параметр зависимости коэффициента диффузии от концентрации. В результате получаем систему уравнений для осредненных безразмерных величин:

$$\begin{aligned} \partial \bar{v} / \partial t + Sc^{-1} (\bar{v} \nabla) \bar{v} &= -\nabla p + \Delta \bar{v} + Ra_v (\bar{w} \nabla) (C \bar{n} - \bar{w}), \\ Sc \frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{v} \nabla) C &= \Delta C + \varepsilon \Delta C^2 + De \Delta (\bar{\omega} \nabla C)^2, \\ \operatorname{div} \bar{v} &= 0, \quad \operatorname{rot} \bar{\omega} = \nabla C \times \bar{n}, \quad \operatorname{div} \bar{\omega} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

В систему уравнений (1) входят безразмерные параметры:

$$Ra_v = \frac{(b \Omega \beta_c \Sigma h)^2}{2 \nu D_0}, \quad Sc = \frac{\nu}{D_0}, \quad \varepsilon = \frac{\alpha \Sigma}{2}, \quad De = \frac{\alpha \Sigma^3}{4 h^2} (b \beta_c)^2. \quad (2)$$

Здесь b – амплитуда, Ω – частота колебаний, β_c – коэффициент зависимости плотности жидкости от концентрации; ν – коэффициент кинематической вязкости, \bar{n} – единичный вектор, направленный вдоль оси вибраций.

2. Постановка задачи

Рассмотрим горизонтальный слой жидкости с твердыми непроницаемыми для потока вещества границами и изучим вибрационно-концентрационное конвективное воздействие на систему. Поле тяжести отсутствует.

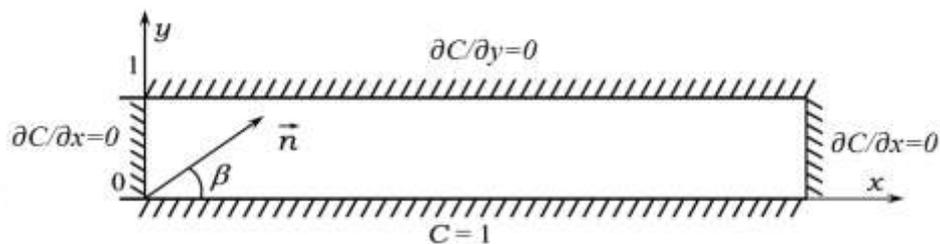


Рис. 1. Плоский слой жидкости с твердыми непроницаемыми для вещества границами

Граничные условия: $\bar{v}|_{\Gamma} = 0$, $w_n|_{\Gamma} = 0$, $\partial C / \partial \bar{n}|_{\Gamma} = 0$, $C(y=0, t=0) = 1$. Решение уравнений (1) осуществлялось методом конечных разностей. Вычислительный код был реализован на языке программирования FORTRAN-90. Расчеты выполнялись на сетке $75 \div 19$ узлов.

3. Результаты расчетов

На рис. 2а, 3а, 4 представлены поля функции тока для различных углов наклона оси вибраций, а на рис. 2б, 3б – поля концентрации.

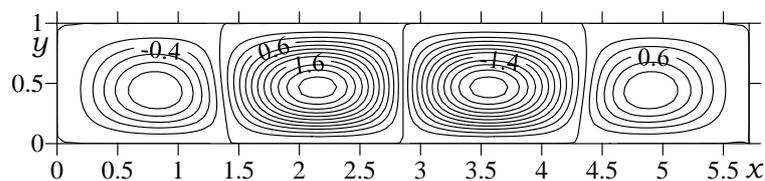


Рис. 2 а. Изолинии полей функции тока в слое в момент времени $t = 600$ при $Ra_v = 1500$, $\beta = 0^\circ$, $\varepsilon = 0.2$, $Sc = 1000$, $De = 10$. Расчет выполнен для волнового числа $k = 1.1$

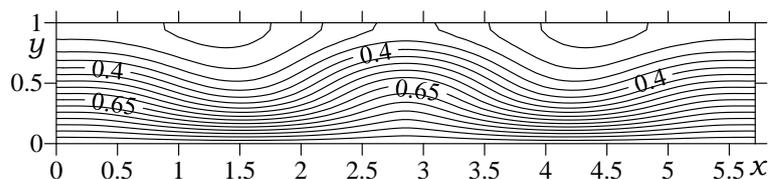


Рис. 2 б. Распределение примеси в слое в момент времени $t = 600$ при $Ra_v = 1500$, $\beta = 0^\circ$, $\varepsilon = 0.2$, $Sc = 1000$, $De = 10$. Расчет выполнен для волнового числа $k = 1.1$

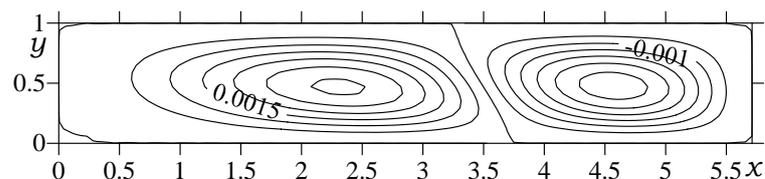


Рис. 3 а. Изолинии полей функции тока в слое в момент времени $t = 600$ при $Ra_v = 1500$, $\beta = 45^\circ$, $\varepsilon = 0.2$, $Sc = 1000$, $De = 10$. Расчет выполнен для волнового числа $k = 1.1$

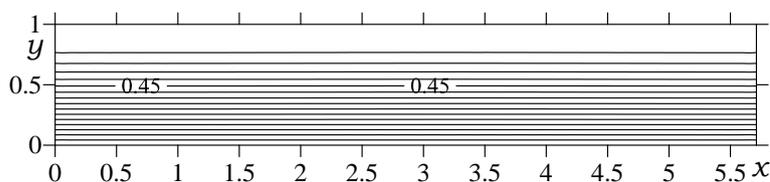


Рис. 3 б. Распределение примеси в слое в момент времени $t = 600$ при $Ra_v = 1500$, $\beta = 45^\circ$, $\varepsilon = 0.2$, $Sc = 1000$, $De = 10$. Расчет выполнен для волнового числа $k = 1.1$

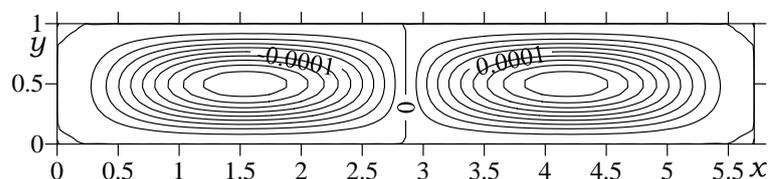


Рис.4. Изолинии полей функции тока в слое в момент времени $t = 600$ при $Ra_v = 1500$, $\beta = 90^\circ$, $\varepsilon = 0.2$, $Sc = 1000$, $De = 10$. Расчет выполнен для волнового числа $k = 1.1$

Как видно, в полости всегда образуется пара вихрей, вращающихся в противоположных направлениях (рис. 2 а, 3 а, 4). Возникающее течение наиболее интенсивно в середине слоя (рис. 2 а). “Замыкание” полости с торцов приводит к возникновению эффекта торможения образования валиков в слое. Изолинии концентрационного поля соответствующим

образом деформируются (рис. 2 б). В случае твердых границ для вибраций, наклоненных под углом $\beta = 45^\circ$, размеры валов становятся разными. В дополнение, их длинные оси стремятся выстроиться перпендикулярно оси вибраций. Интенсивность течения значительно ниже по сравнению со случаем касательных вибраций. Поперечные вибрации $\beta = 90^\circ$ практически полностью подавляют вибрационно-конвективное течение (рис. 4). Перенос примеси фактически становится диффузионным, так что это практически не отражается на поле концентрации.

Таким образом, наиболее простым и эффективным способом управления процессом вымывания примеси является изменение угла наклона оси вибраций по отношению к границам слоя.

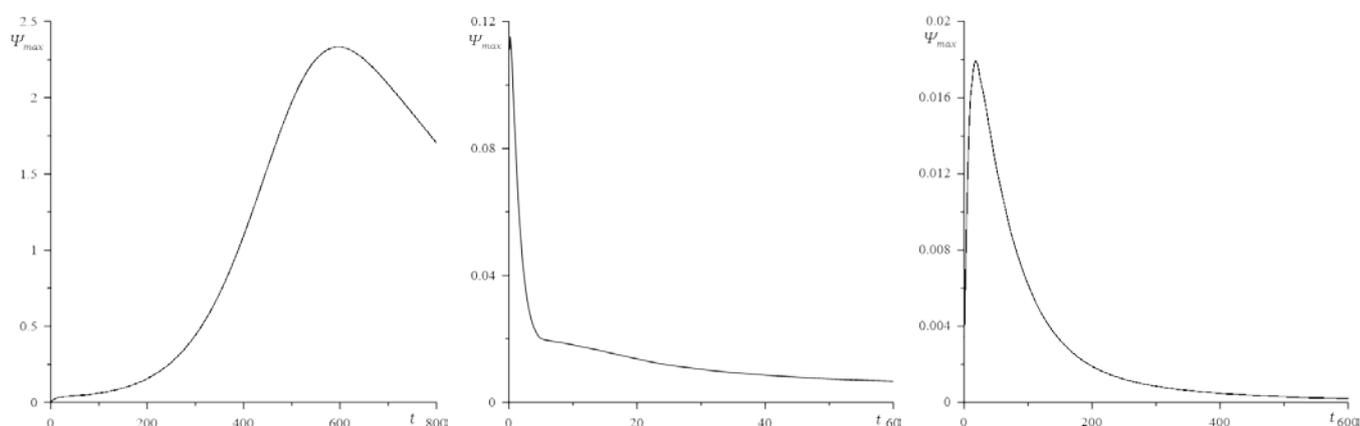


Рис. 5. Зависимость максимума функции тока от времени при $Ra_v = 1500$, $\varepsilon = 0.2$, $k = 1.1$, $Sc = 1000$, $De = 10$, 1 - $\beta = 0^\circ$, 2 - $\beta = 45^\circ$, 3 - $\beta = 90^\circ$

На рис. 5 представлены зависимости максимума функции тока от времени для разных направлений оси вибраций. Видно, что продольные вибрации вызывают в жидкости интенсивное осредненное течение, ускоряющее процесс вымывания примеси с нижней границы в объем жидкости. Время существования вибрационно-концентрационного течения сильно зависит от направления оси вибраций. Оно максимально для касательных вибраций.

4. Заключение

Численно рассмотрена задача о вибрационно-концентрационном конвективном воздействии на плоский слой жидкости при учете зависимости коэффициента диффузии от концентрации. Оказалось, что одним из наиболее эффективных способов усиления или, наоборот, подавления процесса вымывания примеси является изменение угла наклона оси вибраций по отношению к слою. Показано, что наиболее интенсивное вымывание примеси с твердой границы слоя происходит при касательных вибрациях. При определенных параметрах жидких смесей высокочастотные вибрации могут оказывать существенное осредненное влияние на распределение компонентов даже в отсутствие нагрева полости и силы тяжести.

Список литературы

1. *Gershuni G. Z., Lyubimov D. V.* Thermal vibrational convection. Wiley&Sons, 1998. 358 p.
2. *Заварькин М. П., Зорин С. В., Путин Г. Ф.* Экспериментальное исследование вибрационной конвекции // Докл. АН СССР. 1985. Т. 281. № 4. С. 815–816.
3. *Зеньковская С. М., Симоненко И. Б.* О влиянии вибрации высокой частоты на возникновение конвекции // Изв. АН СССР, МЖГ. 1966. № 5. С. 51–55.