

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ «МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени М.В.ЛОМОНОСОВА»

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Влияние пленки естественных
примесей на теплообмен на границе
раздела "ВОДА-ВОЗДУХ".

Выполнил:

Родыгин Вадим Игоревич
студент 404 группы

Научный руководитель:

Плаксина Юлия Юрьевна

Москва

2024

Содержание

Введение	2
1 Модель	3
2 Результаты	4
3 Выводы	5
Список литературы	5

Введение

Уже долгое время в физике сплошных сред изучаются свойства поверхности жидкости: образование поверхностного слоя, теплообмен на поверхности, движение поверхности и др. На протяжении многих лет основной проблемой оставались измерения гидродинамических параметров в тонком слое на границе раздела сред — использование зондов как в работе [1] дает неточные результаты, так как вблизи зонда рельеф поверхности и течение меняются, а мы получаем информацию только в окрестности зонда. Тем не менее, в упомянутой выше работе экспериментально были получены профили температур $T(z)$ в зависимости от глубины погружения зонда z при помощи зондов.

Первый неинвазивный метод, позволяющий получить информацию о поверхностном слое жидкости был продемонстрирован в работе [2]. Результаты этого эксперимента показали, что поверхность может быть как неподвижной, так и движущейся. Следовательно, в зависимости от изучаемой жидкости при численном моделировании требуются различные граничные условия для получения правильных результатов.

Наличие или отсутствие поверхностного слоя зависит от концентрации примесей в растворе. В данном случае рассматривается вода, в которой обычно довольно большое число ионов. В поверхностном слое концентрация ионов ниже, чем в объеме, что приводит к отличным от объема свойствам [?]. При этом в некоторых жидкостях такой слой не образуется, например, в деионизированной воде.

В данной работе численно моделируется теплообмен жидкости с более холодной окружающей средой, что приводит к появлению неустойчивости в системе, а также в зависимости от граничных условий у жидкости появляется холодная пленка или движущаяся поверхность. Основная цель работы — получение профилей $T(z)$ при различных граничных условиях и их сравнение с экспериментальными значениями, полученными в [1]. Кроме того, рассматривается зависимость получаемых результатов от размерности модели. В данном случае представлены результаты двумерного и трехмерного

моделирования.

1 Модель

В работе моделируется теплообмен воды с окружающей средой. С поверхности постоянно отводится поток тепла, равный -210 Вт/м^2 (такой же какой был получен в [1]), решается две задачи с разными размерностями: двумерная и трехмерная. В двумерном случае размер сосуда составляет $0.05 \times 0.01 \text{ м}$, в трехмерном - $0.05 \times 0.01 \times 0.01 \text{ м}$. Чтобы получить установившееся состояние в сосуде с боковых стенок и со дна подводится дополнительный поток тепла, уравновешивающий потери на испарение.

Рассматривается 2 различных условия на поверхности: твердая стенка и проскальзывание. Во втором случае также работает конвекция Марангони, что приводит к значительным изменениям в поверхностном слое.

Система уравнений:

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-\rho \mathbf{l} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{K} = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{l} \quad (3)$$

$$p_{\text{init}} = p + p_{\text{hydro}} \quad (4)$$

$$p_{\text{hydro}} = \rho_{\text{ref}} \mathbf{g} \cdot (\mathbf{r} - \mathbf{r}_{\text{ref}}) \quad (5)$$

$$\mathbf{u} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-\rho \mathbf{l} + \mathbf{K}] + \mathbf{F} + \rho \mathbf{g} \quad (7)$$

$$\text{Случай Марангони } \mathbf{u} \cdot \mathbf{n} = 0 \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_{\mathbf{n}} - (\mathbf{K}_{\mathbf{n}} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0 \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_{\mathbf{n}} = \mathbf{K} \mathbf{n} \quad (10)$$

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = Q + Q_p + Q_{\text{vd}} \quad (11)$$

$$\mathbf{q} = -k \nabla T \quad (12)$$

$$\rho = \frac{p_A}{R_s T} \quad (13)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = q_0 \quad (14)$$

$$Q_{\text{vd}} = \tau : \nabla \mathbf{u} \quad (15)$$

$$\mathbf{n} \cdot [-\rho \mathbf{l} + \mathbf{K}] = \sigma(\nabla_{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} - \nabla_{\mathbf{t}} \sigma \quad (16)$$

$$\theta_w = \frac{\pi}{2} \quad (17)$$

2 Результаты

В результате моделирования получены профили зависимости $T(z)$ усредненной температуры от высоты при различных граничных условиях в двумерном и трехмерном случаях. Проведено сравнение с известными экспериментальными результатами [1] на рисунке ??.

На рисунке ?? представлены все получившиеся в результате моделирования профили. На нем можно заметить сильное отличие двумерного и трехмерного случаев. Однако при наличии конвекции Марангони профиль отклоняется от линейного гораздо быстрее,

независимо от размерности.

3 Выводы

Двумерный и трехмерный случай дают разные результаты для температуры вблизи поверхности. Однако общая закономерность при постановке различных граничных условий сохраняется. В случае твердой стенки на поверхности профиль остается линейным на большей глубине, чем в случае проскальзывания. Такое поведение соответствует получаемым экспериментальным результатам. Толщина поверхностного слоя при наличии движения вдоль границы сильно уменьшается. Профиль для

Сравнение граничных условий Сравнение с катсарос

Список литературы

- [1] K. B. Katsaros, W. T. Liu, J. A. Businger, and J. E. Tillman, “Heat thermal structure in the interfacial boundary layer measured in an open tank of water in turbulent free convection,” *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 83, no. 2, pp. 311–335, 1977.
- [2] W. Spangenberg and W. Rowland, “Convective circulation in water induced by evaporative cooling,” *The Physics of Fluids*, vol. 4, no. 6, pp. 743–750, 1961.