

УДК 532.5.032

ГЕНЕРАЦИЯ СРЕДНЕГО ТЕЧЕНИЯ В ПУЛЬСАЦИОННОМ ПОТОКЕ ОКОЛО ИСКРИВЛЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА

© 2011 г.

Д.В. Любимов, Л.С. Клименко

Пермский госуниверситет

lyubimov@psu.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Изучается генерация среднего течения около искривленной поверхности раздела газ–жидкость под воздействием гармонических поступательных вибраций малой амплитуды. Известные механизмы генерации около поверхностей раздела (механизмы Шлихтинга и Дора) исчезают при переходе к свободной поверхности либо связаны с деформациями поверхности (механизм Лонге-Хиггинса). Найден новый механизм генерации около искривленной свободной поверхности, связанный исключительно со средней кривизной поверхности, нечувствительный к пульсационным деформациям, на примере задачи о пузырьке газа, взвешенном в заполняющей все пространство жидкости, в пренебрежении вязкостью и плотностью газа. Получено, что вокруг пузырька возникает стационарное течение, причем деформация поверхности не влияет на генерацию этого течения. Исследована генерация среднего течения около искривленной поверхности раздела двух жидкостей. Рассматривалась капля жидкости, взвешенная в колеблющейся жидкости иной плотности. Показано, что при сравнимых плотностях и вязкостях жидкостей основной механизм генерации средней завихренности аналогичен шлихтинговскому, в то время как влияние кривизны является вторичным фактором. При малой плотности среды внутри капли (и малой ее динамической вязкости) все указанные выше механизмы могут вносить вклад одного порядка величины, что продемонстрировано на примере газового пузырька, взвешенного в жидкости.

Ключевые слова: поверхность раздела, вибрации, среднее течение, эффективные касательные напряжения, динамический пограничный слой.

Изучается возникновение среднего течения около искривленной поверхности раздела газ–жидкость под действием вибраций. Как известно, одним из интересных проявлений действия вибраций является возникновение осредненных эффектов. Так, в динамическом пограничном слое около твердой стенки, обтекаемой неоднородным пульсирующим потоком, происходит генерация средней завихренности [1, 2], при этом на внешней границе пограничного слоя средняя касательная скорость отлична от нуля, и ее значение может быть использовано в качестве граничного условия при нахождении среднего течения в основной области движения [3]. Для плоской поверхности раздела двух жидкостей, кроме аналогичного механизма генерации [4], существует еще и механизм Дора [5], определяющий эффективные касательные напряжения.

Для случая свободной плоской поверхности оба указанных механизма не работают, и лишь при наличии деформаций поверхности появляется еще один механизм – механизм генерации Лонге-Хиггинса [6], заключающийся в том, что средние течения формируются бегущими по свободной поверхности волнами. Однако

ни один из указанных механизмов не работает, если поверхность будет свободной и недеформируемой.

Авторами найден новый механизм генерации около искривленной свободной поверхности, связанный исключительно со средней кривизной поверхности, нечувствительный к пульсационным деформациям, на примере задачи о пузырьке газа, взвешенном в заполняющей все пространство жидкости, в пренебрежении вязкостью и плотностью газа [7]. Показано, что вокруг пузырька возникает стационарное течение, причем деформация поверхности не влияет на генерацию этого течения. Таким образом, среднее течение возможно и тогда, когда поверхность недеформируемая, например, в случае очень большого поверхностного натяжения. Была получена формула, задающая величину вязких напряжений на внешней границе такого слоя. Эти напряжения независимо от рассматриваемой геометрии пропорциональны квадрату кривизны поверхности и кубу толщины пограничного слоя Стокса и могут играть роль эффективных граничных условий для течения во внешней области.

Авторами также исследована генерация сред-

него течения около искривленной поверхности раздела двух жидкостей. Рассматривалась капля жидкости, взвешенная в колеблющейся жидкости иной плотности. Были определены эффективные граничные условия для скачков касательных скоростей и касательных напряжений, описывающие полученную генерацию. Показано, что при сравнимых плотностях и вязкостях жидкостей основной механизм генерации средней завихренности аналогичен шлихтинговскому, в то время как влияние кривизны является вторичным фактором. Следует ожидать, что при малой плотности среды внутри капли (и малой ее динамической вязкости) все указанные выше механизмы могут вносить вклад одного порядка величины. На примере газового пузырька, взвешенного в жидкости, исследуется взаимодействие указанных механизмов генерации.

Для изучения генерации среднего течения около искривленной поверхности раздела рассмотрим поведение газового пузырька, взвешенного в безграничной жидкости. Течение жидкости и газа возникает под действием внешнего вибрационного поля. Вдали от пузырька жидкость движется поступательно по гармоническому закону с амплитудой b и частотой ω . Жидкости и газ в пузырьке считаем несжимаемыми. Поверхностное натяжение будем считать настолько большим, что поверхность пузырька будет рассматриваться недеформируемой.

Уравнения движения в система отсчета, связанной с центром пузырька, запишем в безразмерном виде:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathbf{v}_1}{\partial t} + \varepsilon \mathbf{v}_1 \cdot \nabla \mathbf{v}_1 &= -\nabla \tilde{p}_1 + \nu_1 \delta^2 \Delta \mathbf{v}_1 - \frac{d\tilde{U}}{dt} \mathbf{k}, \\ \frac{\partial \mathbf{v}_2}{\partial t} + \varepsilon \mathbf{v}_2 \cdot \nabla \mathbf{v}_2 &= -\frac{1}{\gamma^2} \nabla \tilde{p}_2 + \nu_2 \delta^2 \Delta \mathbf{v}_2 - \frac{d\tilde{U}}{dt} \mathbf{k}, \\ \operatorname{div} \mathbf{v}_1 &= 0, \quad \operatorname{div} \mathbf{v}_2 = 0. \end{aligned}$$

Здесь индексом 1 обозначено течение внешней жидкости индексом, 2 – газа в пузырьке; U – скорость центра масс пузырька относительно лабораторной системы отсчета.

Граничные условия вдали и на поверхности пузырька

$$r = \infty: \mathbf{V}_1 = (\cos t - U) \mathbf{k},$$

$$r = 1: \mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2, \quad [p] - \delta^2 \mathbf{n} \cdot [\bar{\sigma}] \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{n} \cdot [\bar{\sigma}] \cdot \boldsymbol{\tau} = 0.$$

Задача характеризуется тремя управляющими безразмерными параметрами: $e = b/a$ – отношение амплитуды вибраций к радиусу пузырька, $\delta = 1/a \sqrt{\nu_1 + \nu_2/\omega}$ – безразмерная толщина пограничного слоя, $\gamma = \sqrt{\rho_2/\rho_1}$. Будем считать все указанные параметры малыми, причем равномерно пригодное разложение удастся построить только тогда, когда параметры одного порядка малости.

С помощью метода сращиваемых асимптотических разложений [8] получены эффективные граничные условия, описывающие генерацию среднего течения:

$$u_9^1 - u_9^2 = \frac{5}{4\omega} \nu \nu_\tau,$$

$$[\sigma_{r9}]_{\delta \rightarrow 0} = -\frac{1}{4} \rho_2 \nu \nu_\tau \sqrt{\frac{2\nu_2}{\omega}} - \frac{3}{2} \frac{\rho_1}{a^2} \nu \nu_\tau \left(\frac{2\nu_1}{\omega} \right)^{3/2},$$

где $u = 3b\omega \sin J$ – амплитуда касательной скорости пульсационного движения внешней жидкости за пределами пограничного слоя,

$$u_t = (1/a)(\partial u / \partial J).$$

Список литературы

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1969.
2. Ниборг В. Акустические течения. Физическая акустика / Под ред. У. Мэзона. Т. 2. Ч. Б. М.: Мир, 1969. С. 364–367.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. Т. 6: Гидродинамика. М.: Физматлит, 2001.
4. Любимов Д.В., Любимова Т.П., Черепанов А.А. Динамика поверхностей раздела в вибрационных полях. М.: Физматлит, 2003. 216 с.
5. Dore D. // Proc. Camb. Phil. Soc. 1973. V. 74. P. 333–347.
6. Longuet-Higgins M.S. // Philosophical Transactions A. 1953. V. 245. P. 353–581.
7. Клименко Л.С., Любимов Д.В. // Неравновесные процессы в сплошных средах: Матер. конф. Пермь, 2007. С. 222–225.
8. Ван Дайк М. Методы возмущений в механике жидкости. М.: Мир, 1967. 310 с.

GENERATION OF AN AVERAGE FLOW IN A PULSATION FLOW NEAR A CURVED FLUID INTERFACE

D.V. Lyubimov, L.S. Klimenko

The paper deals with the investigation of generation of an average flow near a curved gas–liquid interface under the action of harmonic translational vibrations of small amplitude. Known mechanisms of flow generation near fluid interfaces (Schlichting and Dore mechanisms) vanish with the transition to the free surface and other mechanisms are related to the surface deformations (Longuet-Higgins mechanism). We found a new mechanism of flow generation near a curved free surface that is associated

exclusively with the average surface curvature. This mechanism is insensitive to the pulsational deformations. This mechanism is investigated for the problem of a gaseous bubble suspended in an unbounded liquid, neglecting the viscosity and density of the gas. It is found that a steady flow arises around the bubble; besides deformation of the surface has no effect on the generation of this flow. The generation of an average flow near the curved liquid-liquid interface is also investigated. A liquid drop suspended in a vibrating liquid of different density is studied. It is shown that for comparable density and viscosity of liquids the dominating mechanism of average vorticity generation is similar to the Schlichting mechanism, whereas the effect of the interface curvature is less important. At low density of liquid inside the drop (and its small dynamic viscosity), all of the above mechanisms could contribute to the same order of magnitude. We demonstrate the interaction of these generation mechanisms considering a gaseous bubble suspended in an unbounded liquid.

Keywords: fluid interface, vibrations, average flow, effective tangential stress, dynamical boundary layer.