

УДК 532.5;532.6

## АНОМАЛЬНЫЕ ОТКЛИКИ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ БИНАРНОЙ СМЕСИ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕРМИЧЕСКИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

© 2011 г.

Л.Х. Ингель

НПО «Тайфун», Обнинск Калужской обл.

ingeli@obninsk.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Обращается внимание на особые гидродинамические свойства стратифицированных двухкомпонентных жидкостей (например, соленой морской воды). В линейном приближении исследована реакция таких сред на горизонтально-неоднородные механические и термические воздействия на горизонтальной поверхности. Показано, что двухкомпонентный характер среды может приводить к ряду нетривиальных эффектов, в частности к аномально интенсивным термическим откликам на упомянутые воздействия.

*Ключевые слова:* стратифицированные жидкости, двухкомпонентные среды, линейный отклик, горизонтально-неоднородные возмущения, соленая морская вода.

1. Некоторые известные ранее «удивительные» [1] гидротермодинамические свойства бинарных смесей связаны с различием значений коэффициентов переноса для разных субстанций. При этом обычно считается, что нетривиальные эффекты возникают в ситуациях, когда одна из двух субстанций стратифицирована неустойчиво («конвекция, обусловленная двойной (дифференциальной) диффузией» [1]).

В статье сообщается о ряде эффектов которые существуют и при одинаковых значениях коэффициентов переноса, и при устойчивой стратификации обеих субстанций. Решается линейная стационарная задача о возмущениях, вносимых в стратифицированную двухкомпонентную жидкость (например, соленую воду) неоднородными касательными напряжениями на ее поверхности.

Рассматривается полуограниченный слой среды  $z \leq 0$  (ось  $z$  направлена вертикально вверх), стратифицированный по температуре и концентрации примеси (для определенности будем говорить о соленой воде) таким образом, что гидростатическое равновесие устойчиво (при этом по отдельности температурная и соленостная стратификации могут быть и неустойчивыми, но устойчива суммарная стратификация плотности).

Линеаризованная стационарная система уравнений для возмущений в приближении Буссинеска имеет вид [1]:

$$0 = -\frac{1}{\rho_0} \nabla p + \nu \nabla^2 \mathbf{v} + g(\alpha T - \beta s) \mathbf{e}_z, \quad \nabla \mathbf{v} = 0,$$

$$\gamma_T \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_z = \lambda \nabla^2 T, \quad \gamma_s \mathbf{v} \cdot \mathbf{e}_z = \chi \nabla^2 s.$$

Здесь  $T$  и  $s$  – возмущения температуры и концентрации примеси (солености) соответственно;  $\mathbf{v}$  – вектор возмущения поля скорости;  $p$  – возмущение давления,  $\mathbf{e}_z$  – единичный вектор в направлении оси  $z$ ;  $\rho_0$  – отсчетная плотность среды,  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости,  $\lambda$  – коэффициент температуропроводности,  $\chi$  – коэффициент диффузии примеси,  $\alpha$  – термический коэффициент расширения среды,  $\beta$  – коэффициент ее соленостного сжатия,  $g$  – ускорение свободного падения. Постоянные значения фоновых вертикальных градиентов каждой из субстанций  $\gamma_T$  и  $\gamma_s$ , как упоминалось, предполагаются такими, что фоновое состояние конвективно устойчиво [1].

Предполагаем, что на поверхности жидкости  $z = 0$  заданы стационарные касательные напряжения, гармонически зависящие от горизонтальной координаты  $x$  (ограничиваемся двумерной задачей на плоскости  $(x, z)$ ):

$$\rho_0 \nu \partial u / \partial z = E \sin kx \text{ при } z = 0,$$

где  $E$  – амплитуда напряжения,  $u$  – горизонтальная составляющая скорости,  $k$  – волновое число. Пренебрегаем деформациями поверхности, так что вертикальная составляющая скорости  $w$  на поверхности  $z = 0$  обращается в ноль. Для температуры и примеси на поверхности предполагается выполнение краевых условий третьего рода:

$$\partial T / \partial z = -T / h_T, \quad \partial s / \partial z = -s / h_s \text{ при } z = 0,$$

где неотрицательные величины  $h_T, h_s$  – задан-

ные масштабы длины. Предполагаем, что вдали от поверхности (при  $z \rightarrow -\infty$ ) все возмущения затухают.

Для возмущений разыскиваются стационарные решения, гармонически зависящие от горизонтальной координаты  $x$ :  $u(x, z) = U(z) \sin(kx)$ ,  $w(x, z) = W(z) \cos(kx)$  и т.д. Для амплитуд  $W(z)$  и др. получаем линейную дифференциальную систему уравнений.

Анализ полученных решений приводит к ряду нетривиальных результатов. В однокомпонентной среде (стратифицированной только по температуре) возмущения при достаточно сильной фоновой гидростатической устойчивости, как и следовало ожидать, быстро затухают с увеличением глубины и имеют амплитуды тем меньшие, чем устойчивее стратификация. Но добавление устойчивой стратификации примеси (соли) к устойчивой температурной стратификации, как показывает решение, может приводить не к убыванию амплитуды термических возмущений и глубины их проникновения в среду (чего, на первый взгляд, можно было ожидать), а к их существенному возрастанию. Одно из условий такого аномально интенсивного термического отклика – различие краевых условий для двух субстанций, т.е. различие значений параметров  $h_T$  и  $h_S$ .

2. Из предыдущего следуют возможности аномально интенсивных термокапиллярных эффектов в стратифицированных двухкомпонентных средах, поскольку речь идет о возможности интенсивного термического отклика среды (даже гидростатически устойчивой) на неоднородные касательные напряжения на поверхности. В частности, показана возможность существенного расширения традиционно рассматриваемой области термокапиллярной неустойчивости (Бенара – Марангони), возможность глубокого проникновения возмущений в устойчиво стратифицированную среду.

Такого типа неустойчивость обычно рассматривается только в достаточно тонких слоях жидкости (в воде – до нескольких миллиметров). Принято считать, что в более толстых слоях такая неустойчивость обычно должна быть незаметной на фоне проявлений конвективной неустойчивости Рэлея–Тейлора. Но в двухкомпонентной среде (например, в соленой морской воде) возможны ситуации, когда при неустойчивой температурной стратификации (нагрев снизу) плотностная стратификация, тем не менее, гидростатически устойчива, благодаря устойчивой стратификации концентрации примеси (соли).

Неустойчивость Рэлея – Тейлора при этом подавлена, как и конвекция, обусловленная «двойной (дифференциальной) диффузией» [1], а термокапиллярная неустойчивость не только возможна, но и «свободна от конкуренции». В этом случае приобретает смысл исследование такого механизма неустойчивости и в сколь угодно толстых слоях жидкости.

На это было обращено внимание в [2], где рассмотрен пример анализа устойчивости полуграниченного объема воды, стратифицированного как по температуре, так и по солености. Показано, что, несмотря на устойчивую стратификацию плотности, благодаря термокапиллярному эффекту, может существовать неизвестная ранее достаточно обширная область неустойчивости.

Как стало понятно позже, набор краевых условий для возмущений температуры и примеси, рассмотренный в задаче [2], оказался (в известной мере случайно) относящимся к весьма специальному, вырожденному, случаю одинаковых краевых условий (2-го рода). Но, как упоминалось выше, для возникновения аномально интенсивных термических возмущений принципиальную роль играет как раз различие краевых условий для возмущений температуры и концентрации примеси. Тем самым, из рассмотрения выпал важный класс явлений, обусловленных различием граничных условий.

В настоящем исследовании проанализирован более общий случай различных краевых условий для разных субстанций и показано, что это действительно может существенно расширять область неустойчивости и приводить к качественному разнообразию структуры растущих возмущений.

Результаты показывают, что с учетом поверхностных эффектов значительная часть области физических параметров верхнего слоя двухкомпонентной среды, традиционно считающейся устойчивой, строго говоря, является областью неустойчивости.

3. Аналогично п. 1, теоретически исследован отклик двухкомпонентной среды на неоднородный нагрев на верхней границе (т.е. реакция на термические, а не механические воздействия). Показано, что и в этом случае возможен ряд нетривиальных эффектов. В частности, усиление устойчивости плотностной стратификации может приводить не к уменьшению, а к увеличению амплитуды отклика среды на неоднородные притоки тепла и к увеличению глубины проникновения термических возмущений в среду даже при сильной фоно-

вой гидростатической устойчивости. Ранее автором обнаружена также возможность эффективной «отрицательной теплоемкости» подобных неравновесных сред – притоки тепла могут приводить не к повышению, а к понижению их температуры [3, 4].

*Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 10-05-01128-а).*

#### Список литературы

1. Тернер Дж. Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977.
2. Ингель Л.Х. // Журнал технической физики. 2001. Т. 71, №1. С. 128–130.
3. Ингель Л.Х. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 72, №10. С. 753–757.
4. Ингель Л.Х. // УФН. 2002. Т. 172, №6. С. 691–699.

### ANOMALOUS RESPONSES OF THE STRATIFIED BINARY MIXTURE TO MECHANICAL AND THERMAL EFFECTS

*L.Kh. Ingel*

Attention is drawn to the particular hydrodynamic features of the stratified two-component media (for example, salt marine water). The response of such media to the horizontally inhomogeneous mechanical and thermal effects on the horizontal surface has been studied in the linear approximation. It has been shown that the two-component nature of medium can result in a series of the nontrivial effects, in particular, to abnormally intensive thermal responses to the mentioned influences.

*Keywords:* stratified fluids, two-component media, linear response, horizontally inhomogeneous disturbances, salt marine water.