

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

"Антиконвекция"

Л.Х. Ингель

В системах, состоящих из двух несмешивающихся жидкостей в поле силы тяжести, конвективная неустойчивость может возникать не только при нагреве снизу, но и при горизонтально-однородном нагреве сверху, т.е. при устойчивой плотностной стратификации каждой из сред. Пояснены несколько механизмов такой неустойчивости, обнаруженных в последние годы.

PACS numbers: 44.25. + f, 47.20.Bp

Содержание

1. Введение (779)
 2. Конвективная неустойчивость может возникать и при устойчивой стратификации. Антиконвекция Веландера (779).
 3. Эффективность использования простых физических соображений при описании антиконвекции. "Закон двух третей" (781).
 4. Антиконвекция, связанная с фазовыми переходами на границе раздела (782).
 5. Воздух над соленой водой — еще один механизм антиконвекции (783).
 6. Термокапиллярная антиконвекция (784).
 7. Заключение (784).
- Список литературы (784).

1. Введение

Хорошо известно, что в жидкости (газе) в поле силы тяжести при однородном нагревании снизу или охлаждении сверху может возникать конвективная неустойчивость (неустойчивость Рэлея–Тейлора). Ее физический смысл вполне прозрачен: более холодная, плотная жидкость тонет, а легкая, нагретая всплывает за счет архимедовых сил.

В настоящей заметке рассматриваются противоположные ситуации (нагрев сверху, охлаждение снизу), когда, казалось бы, нет никаких оснований предполагать возможность возникновения неустойчивости.

2. Конвективная неустойчивость может возникать и при устойчивой стратификации. Антиконвекция Веландера

Веландер [1] впервые получил теоретический результат, на первый взгляд кажущийся парадоксальным: состоя-

ние механического равновесия горизонтально-однородной системы, состоящей из двух несмешивающихся жидкостей, нагреваемых сверху (устойчиво стратифицированных) может оказаться неустойчивым с последующим развитием конвекции в обеих жидкостях вблизи границы раздела. Позже подобный результат был независимо получен в [2, 3]. Веландер назвал это явление "антиконвекцией". Физический механизм антиконвекции по своей природе существенно отличается от рэлеевского. Кратко его можно пояснить следующим образом.

Пусть, например, в некотором объеме вблизи границы раздела в верхней (более легкой) среде возникло сколь угодно малое по амплитуде термическое возмущение, и этот объем оказался более теплым и менее плотным, чем соседние с ним по горизонтали объемы среды. Вес столба среды в этом месте будет меньше "фона". Поэтому в верхней среде у границы раздела возникнет горизонтальный градиент давления, такой, что возникающая горизонтальная составляющая силы давления будет направлена от периферии к центру возмущенной (нагретой) области. Следовательно, в рассматриваемой области верхней среды возникнут горизонтальные сходящиеся течения (и в силу неразрывности — восходящие вертикальные движения, рис. 1). Вследствие вязкости в сходящееся горизонтальное движение будет в какой-то мере вовлечен и верхний слой

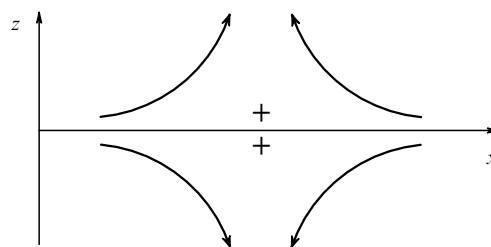


Рис. 1. Схематическое изображение линий тока в верхней и нижней средах в случае развития антиконвекции "конвергентного" типа. Граница раздела совпадает с осью абсцисс. Указаны знаки развивающихся возмущений температуры. В случае антиконвекции "дивергентного" типа линии тока направлены противоположно при тех же знаках температурных возмущений.

Л.Х. Ингель. Институт экспериментальной метеорологии НПО "Тайфун"
249020, Калужская обл., г. Обнинск, просп. Ленина 82, Россия
Тел. (08439) 7-13-21. Факс (08439) 4-09-10
E-mail: typhoon@storm.iasnet.com

Статья поступила 3 декабря 1996 г.

нижней среды. Эти конвергентные горизонтальные течения в нижней среде из-за неразрывности означают возникновение в этой среде вертикальных нисходящих движений. Следует пояснить, что деформацией границы раздела, как показывают оценки, во многих важных случаях можно пренебрегать. Поэтому сходящиеся по горизонтали частицы верхней среды могут двигаться по вертикали только вверх, а нижней среды — только вниз (см. рис. 1). Нисходящие движения в нижней среде приводят к появлению положительной аномалии температуры под границей раздела (поскольку система нагревается сверху, нисходящие движения приносят дополнительное тепло). Это термическое возмущение за счет теплообмена через границу раздела усиливает начальное термическое возмущение в верхней среде. Такая положительная обратная связь, как показано в [1, 2], при определенных соотношениях между параметрами сред может доминировать над имеющимися в системе отрицательными обратными связями, и состояние механического равновесия в такой системе может быть неустойчивым.

В рассмотренном случае нижняя среда играет роль источника термических возмущений, стимулирующих течения в верхней среде. А эти течения, в свою очередь, усиливают термические возмущения в нижней среде и т.д.

В зависимости от соотношения параметров сред возможен и другой сценарий развития неустойчивости.

Пусть, например, в результате случайного возмущения элемент верхней жидкости сместился вниз по направлению к границе раздела. В своем новом положении этот элемент оказывается теплее окружения, поскольку система однородно нагревается сверху. В случае, если верхняя жидкость обладает относительно малыми температуропроводностью и термическим расширением, этот элемент будет остывать достаточно медленно и иметь при этом относительно малую плавучесть. Однако за счет теплообмена через границу раздела и в нижней, тяжелой жидкости под границей появится элемент, имеющий более высокую температуру, чем окружающая жидкость. Если в нижней жидкости тепловое расширение достаточно велико, то в ней нагретый элемент будет заметно легче окружающей среды. Это вызывает восходящее движение нагретого объема нижней среды и его растекание вдоль границы раздела. За счет вязкости горизонтальное течение будет в какой-то мере увлекать и некоторый участок нижнего слоя верхней среды (на рис. 1 в этом случае следует поменять направления линий тока на обратные, хотя, подчеркнем, знак термических возмущений остается неизменным). Возникшие и в верхней среде расходящиеся горизонтальные течения из соображений неразрывности должны приводить к нисходящим движениям в этой среде, т.е. усиливать первоначальное возмущение.

Из линейного анализа гидродинамической устойчивости, выполненного в [1, 2], явствует, что и эта положительная обратная связь при определенных соотношениях между параметрами сред может быть достаточно сильной для развития неустойчивости.

В последнем случае верхняя среда является источником термических возмущений, стимулирующих течения в нижней среде. Последние в свою очередь усиливают упомянутые термические возмущения и т.д. Такую антиконвекцию мы условно называем "дивергентной" (поло-

жительным отклонением температуры соответствует положительная горизонтальная дивергенция течений, возникающих у границы раздела). В первом рассмотренном выше случае антиконвекцию в этом смысле можно назвать "конвергентной".

Из линейного анализа устойчивости [1, 2] вытекает, что возникновение антиконвекции возможно далеко не в любых двухслойных системах. Например, был сделан вывод, что антиконвекция возможна в системе ртуть — вода, но невозможна в системе вода — воздух, представляющей гораздо больший интерес в связи с геофизическими приложениями. Но даже и в благоприятных ситуациях антиконвекция до сих пор не идентифицирована экспериментально, хотя отдельные попытки предпринимались. Вероятно, эти неудачи связаны с серьезными техническими трудностями (см. [4] и библиографию к этой работе).

В [1] было высказано предположение, что теоретический "запрет" на возникновение антиконвекции в системе вода — воздух может не распространяться на случай турбулизированных природных сред — взаимодействующих атмосферы и океана. Дело в том, что если пользоваться эффективными значениями турбулентных коэффициентов обмена (вместо молекулярных), то условия возникновения антиконвекции существенно изменяются. Кроме того, при рассмотрении таких сред в задаче появляется еще одна "степень свободы" — существенный изменяемый параметр. Имеется в виду сосредоточенный вблизи границы раздела горизонтально-однородный источник (сток) тепла, связанный с радиационными эффектами и фазовыми переходами на поверхности воды.

В моделях [1, 2] предполагалось, что фоновый вертикальный поток тепла один и тот же в верхней и в нижней средах. На границе раздела он не претерпевал никаких изменений. Это означает, что фоновые вертикальные градиенты температуры в двух средах однозначно связаны между собой. Если же допустить, что на границе раздела может существовать фоновый источник (сток) тепла с интенсивностью Q [Вт м^{-2}], связанный с радиационными эффектами или фазовыми переходами, то фоновый вертикальный поток тепла при переходе через границу раздела претерпевает скачок, равный по абсолютной величине $|Q|$. Поскольку в природных условиях значение Q может меняться в весьма широких пределах (в зависимости, например, от времени суток), то в широких пределах могут меняться и фоновые вертикальные градиенты температуры в двух средах.

Задачи с учетом упомянутых факторов рассмотрены в ряде работ Перестенко и автора (см., например, [4, 5] и библиографию к этим работам). Показано, что в зависимости от значения Q возможности возникновения антиконвекции в двухслойной системе чрезвычайно расширяются. В частности, в системе вода — воздух, в принципе, возможна антиконвекция обоих рассмотренных выше типов.

Этот результат понятен из следующих простых соображений. Меняя значение интенсивности источника (стока) тепла на границе раздела Q , всегда можно добиться того, чтобы в одной из сред температурная (плотностная) стратификация стала близкой к нейтральной. Такая среда легко приходит в движение из-за температурных неоднородностей, возникших у границы раздела в другой среде. А возникшее в первой упомяну-

той среде движение, будучи достаточно интенсивным, легко стимулирует возникновение и усиление термических неоднородностей во второй среде и т.д. Иными словами, антиконвекция особенно легко возникает в системе, в которой одна из сред стратифицирована слабо, а другая — достаточно устойчиво. Если слабо стратифицирована верхняя среда, то, как легко видеть, такая ситуация благоприятна для развития антиконвекции "конвергентного" типа. Противоположный случай благоприятен для "дивергентного" типа антиконвекции.

3. Эффективность использования простых физических соображений при описании антиконвекции. "Закон двух третей"

В работах [1, 2, 5] исследовались в строгой постановке линейные задачи устойчивости состояния механического равновесия двух жидких сред, однородно нагреваемых сверху. В [1, 5] эти среды занимали верхнее и нижнее полупространства соответственно, в [2] рассматривались горизонтальные жидкие слои конечной толщины. В каждой из сред рассматривались линеаризованные системы уравнений Навье–Стокса, неразрывности и переноса тепла в приближении Буссинеска. В простейшем двумерном случае рассматриваемая система уравнений имеет вид

$$\partial_t u_i = -\frac{\partial_x p_i}{\bar{\rho}_i} + v_i \Delta u_i, \quad (1)$$

$$\partial_t w_i = -\frac{\partial_z p_i}{\bar{\rho}_i} + v_i \Delta w_i + \alpha_i g \Theta_i, \quad (2)$$

$$\partial_x u_i + \partial_z w_i = 0, \quad (3)$$

$$\partial_t \Theta_i + \gamma_i w_i = \kappa_i \Delta \Theta_i. \quad (4)$$

Здесь индекс $i = 1, 2$ обозначает величины, относящиеся к верхней и нижней средам соответственно; u и w — составляющие скорости вдоль горизонтальной оси x и направленной вертикально вверх оси z соответственно; Θ — возмущение температуры (точнее, потенциальной температуры — величины, которой пользуются в геофизике, с учетом сжимаемости сред); p — возмущение давления, $\bar{\rho}$ — средняя плотность среды; $\gamma \geq 0$ — фоновый вертикальный градиент потенциальной температуры; α — термический коэффициент расширения; g — ускорение свободного падения; v и κ — коэффициенты вязкости и температуропроводности соответственно.

Предполагается, что вдали от границы раздела (при $|z| \rightarrow \infty$) все возмущения должны затухать. Деформациями этой границы пренебрегается (для системы вода–воздух и во многих других случаях это легко обосновать). На границе предполагается непрерывность касательных напряжений, температуры и возмущений потока тепла. Что касается фонового вертикального потока тепла, определяемого значениями градиентов температуры γ_i , то на границе раздела возможен его разрыв (иными словами, допускается наличие сосредоточенного на границе горизонтально-однородного источника (стока) тепла).

Рассматриваемая задача устойчивости, вообще говоря, достаточно сложна и, как правило, требует численного анализа (хотя некоторые асимптотики удается исследовать аналитически). Заслуживает внима-

ния тот факт, что для столь сложной системы многие результаты удается понять и воспроизвести, не решая дифференциальных уравнений, непосредственно из простых физических соображений [4, 6]. Остановимся в качестве примера на оценке инкрементов растущих возмущений в системе вода–воздух [6].

Будем рассматривать наиболее благоприятную для развития "конвергентной" антиконвекции ситуацию, когда в фоновом состоянии нижняя среда стратифицирована устойчиво, а верхняя — нейтрально ($\gamma_1 = 0$, $\gamma_2 > 0$). Пусть на границе раздела $z = 0$ задано возмущение в поле температуры в виде

$$\Theta|_{z=0} = \Theta_0 \cos(kx) \exp(\omega t), \quad (5)$$

где $\Theta_0 > 0$, ω , $k = 2\pi/L$, L — постоянные, смысл которых очевиден. Горизонтально-неоднородный нагрев должен приводить к возмущениям давления и возникновению течений вблизи границы раздела. Оценим амплитуды возмущений давления и скорости, предполагая, что они аналогичным образом зависят от x и t , и опуская ниже для краткости множители типа $\cos(kx) \exp(\omega t)$. Обозначим через H_1 высоту, до которой температурное возмущение проникает в верхнюю среду. Предполагаем, что H_1 много меньше длины волны L , т.е. возмущения "прижаты" к границе раздела (это, как и ряд других предположений, можно будет проверить *a posteriori*). В этом случае можно, во-первых, пренебрегать горизонтальным обменом (в уравнениях (1), (2), (4) $\partial^2/\partial x^2 \ll \partial^2/\partial z^2$), во-вторых, пользоваться приближением гидростатики. Последнее означает учет в уравнении (2) только первого и последнего слагаемых правой части, откуда

$$|p_1| \sim g \bar{\rho}_1 \alpha_1 H_1 \Theta_0, \quad \left| \frac{\partial_x p_1}{\bar{\rho}_1} \right| \sim g \alpha_1 H_1 \Theta_0 k. \quad (6)$$

Предполагаем, что в уравнении (1) оба первых слагаемых существенны (это означает, что они должны быть одного порядка). Отсюда с учетом (6) характерное значение горизонтальной скорости течений, возникающих в верхней среде, есть

$$|u_1| \sim \frac{k p_1}{\bar{\rho}_1 \omega} \sim \frac{g \alpha_1 H_1 \Theta_0 k}{\omega}, \quad (7)$$

а поток количества движения из верхней среды в нижнюю

$$\bar{\rho}_1 v_1 \left| \frac{\partial u_1}{\partial z} \right| \sim \bar{\rho}_1 v_1 \frac{|u_1| - |u|_{z=0}}{H_1}. \quad (8)$$

Будем предполагать, что движения, возникающие за счет вязкости, в нижней среде много медленнее, чем в верхней, так, что $|u|_{z=0} \ll |u_1|$. Тогда

$$\bar{\rho}_1 v_1 \left| \frac{\partial u_1}{\partial z} \right| \sim \frac{\bar{\rho}_1 v_1 |u_1|}{H_1} \sim \frac{\bar{\rho}_1 v_1 g \alpha_1 \Theta_0 k}{\omega}. \quad (9)$$

Интересно отметить, что последняя величина не зависит от H_1 . Ее следует приравнять абсолютной величине потока количества движения от границы раздела в глубь нижней среды:

$$\bar{\rho}_2 v_2 \left| \frac{\partial u_2}{\partial z} \right| \sim \frac{\bar{\rho}_2 v_2 |u|_{z=0}}{H_2}, \quad (10)$$

где H_2 — характерная глубина проникновения возмущений в нижнюю среду. Отсюда

$$|u|_{z=0} \sim |u_1| \frac{\bar{\rho}_1 v_1 H_2}{\bar{\rho}_2 v_2 H_1}. \quad (11)$$

Из соображений неразрывности

$$|w_2| \sim k H_2 |u|_{z=0}. \quad (12)$$

Предполагаем, что первые два слагаемых уравнения (4) в нижней среде — величины одного порядка. Тогда возникающее в нижней среде возмущение температуры есть

$$|\Theta_2| \sim \frac{\gamma_2 |w_2|}{\omega}. \quad (13)$$

Это температурное возмущение и должно поддерживать течения в верхней среде. Из непрерывности возмущения потока тепла на границе следует

$$\bar{\rho}_2 C_2 \kappa_2 |\partial_z \Theta_2| = \bar{\rho}_1 C_1 \kappa_1 |\partial_z \Theta_1|,$$

где C — теплопроводность при постоянном давлении. Заменяя производные отношениями конечных разностей, получаем

$$\frac{\bar{\rho}_2 C_2 \kappa_2 (\Theta_2 - \Theta_0)}{H_2} \sim \frac{\bar{\rho}_1 C_1 \kappa_1 \Theta_0}{H_1}.$$

Отсюда

$$\Theta_2 - \Theta_0 \sim \Theta_0 \frac{\bar{\rho}_1 C_1 \kappa_1 H_2}{\bar{\rho}_2 C_2 \kappa_2 H_1}. \quad (14)$$

Если говорить о системе вода — воздух, то в правой части (14) имеется малый множитель $\bar{\rho}_1/\bar{\rho}_2 \sim 10^{-3}$, и можно предположить, что весь безразмерный коэффициент при Θ_0 мал. Отсюда следует, что

$$\Theta_2 - \Theta_0 \ll \Theta_0, \quad \Theta_2 \sim \Theta_0. \quad (15)$$

Подставив последнее соотношение в (13), с учетом (12), (11) и (7) получаем

$$\frac{\bar{\rho}_1 v_1 \alpha_1}{\bar{\rho}_2 v_2 \alpha_2} \frac{N_2^2 k^2 H_2^2}{\omega^2} \sim 1, \quad (16)$$

где $N_2^2 = \alpha_2 g \gamma_2$ — квадрат "частоты плавучести" (частоты Брента — Вайсяля) в нижней среде. Предположим, что глубина проникновения возмущения в нижнюю среду определяется диффузионным законом

$$H_2 \propto \sqrt{\frac{v_2}{\omega}}. \quad (17)$$

Подставив (17) в (16), получаем дисперсионное соотношение

$$\omega \sim \left(\frac{\bar{\rho}_1 \alpha_1}{\bar{\rho}_2 \alpha_2} v_1 N_2^2 k^2 \right)^{1/3}. \quad (18)$$

Инкремент экспоненциального роста возмущений сильнее всего зависит от длины волны $L = 2\pi k^{-1}$ — убывает как $L^{-2/3}$. Как и следовало ожидать, он возрастает с

ростом устойчивости стратификации нижней среды ($\propto \gamma_2^{1/3}$). Интересно отметить также отсутствие зависимости от κ_1 , κ_2 и v_2 .

Вышеизложенные рассуждения содержат много предположений, которые, на первый взгляд, могут показаться весьма произвольными. Но детальная проверка показывает, что они имеют достаточно широкую область применимости. Численные решения задачи устойчивости [4, 6] показывают, что "закон двух третей", $\propto (Nk)^{2/3}$, действительно характерен для длинноволновых асимптотик дисперсионных кривых.

Интересно отметить, что подобные простые нестрогие физические рассуждения позволили получить ряд правильных результатов и для рассмотренных ниже более сложных механизмов неустойчивости, связанных с эффектами испарения с поверхности и др. [4, 7, 8].

4. Антиконвекция, связанная с фазовыми переходами на границе раздела

Выше не учитывались эффекты испарения на границе раздела. Между тем, эти эффекты могут приводить к еще одному эффективному механизму положительной обратной связи [4, 7, 9]. Рассмотрим его на примере системы вода — воздух.

При учете испарения с поверхности воды воздух стратифицирован по удельной влажности q . В отсутствие возмущений фоновая влажность q убывает с высотой. Поскольку влажный воздух легче сухого, такая влажностная стратификация вносит дестабилизирующий вклад в плотностную стратификацию воздуха. Но мы рассматриваем ситуации, когда это может лишь частично компенсировать устойчивую температурную стратификацию воздуха. Так что фоновая стратификация плотности в обеих средах остается устойчивой (в предельном случае — нейтральной).

Пусть на границе раздела возникла бесконечно малая по амплитуде термическая неоднородность, из-за чего участок поверхности воды стал чуть холоднее окружения. Вследствие теплообмена и воздух в некотором слое над этим участком станет холоднее окружения. Охлажденный более плотный воздух станет растекаться вдоль этой поверхности и оседать. Это оседание будет переносить сверху к поверхности более сухой воздух. Осушение воздуха у поверхности воды может приводить к усилению испарения. Это означает дальнейшее охлаждение рассматриваемого участка поверхности. Таким образом, имеется обратная связь, способная усиливать первоначальное термическое возмущение поверхности воды, что в свою очередь усиливает нисходящее движение в воздухе и т.д.

В описанном механизме положительной обратной связи есть элемент, который может показаться парадоксальным. *Испарение при охлаждении* участка поверхности воды *не уменьшается*, как это, казалось бы, должно быть, *а возрастает!* Это требует пояснений.

При охлаждении поверхности воды уменьшается насыщающая влажность воздуха непосредственно над этой поверхностью (при анализе устойчивости [4, 9] предполагается, что удельная влажность воздуха при $z = 0$ равна ее насыщающему значению). При прочих равных условиях уменьшение влажности у поверхности $z = 0$ означает уменьшение диффузионного потока влаги вверх от поверхности, что соответствует уменьшению

испарения. Но дело в том, что при наличии фоновой стратификации влажности ("влажностной неравновесности" системы) существует еще один фактор изменения влажности воздуха при $z > 0$. Это вертикальные движения, возникающие вследствие появления в системе горизонтальных термических неоднородностей. Над охлажденным участком поверхности воды это нисходящие движения. Они приносят более сухой воздух сверху в некоторую область $z > 0$. Таким образом, при охлаждении участка поверхности воды влажность воздуха на разных высотах уменьшается за счет действия двух разных механизмов. Во-первых, вследствие уменьшения ее насыщающего значения при $z = 0$, что наиболее сильно сказывается вблизи поверхности. Во-вторых, вследствие возникновения в воздухе нисходящих движений, что сильнее сказывается на больших высотах. В зависимости от соотношения амплитуд этих двух слагаемых возмущения влажности (это определяется, в частности, значением фоновой стратификации по влажности и горизонтальными масштабами рассматриваемого возмущения) вертикальный градиент влажности при $z = 0$, т.е. испарение с поверхности воды, может не только уменьшаться, но и увеличиваться. Описанный выше механизм "испарительной" неустойчивости действует только во втором случае, т.е. при достаточной "влажностной неравновесности" фоновом состоянии системы.

Линейный анализ устойчивости показал, что этот механизм положительной обратной связи может быть весьма эффективным. В отличие от механизма антиконвекции Веландера испарительный механизм может приводить не только к монотонным, но и к колебательным режимам развития неустойчивости. Нетрудно видеть, что этот механизм сохраняется и в том случае, если воздух ограничен снизу не поверхностью воды, а твердой увлажненной поверхностью [7].

Описанный механизм весьма подробно проанализирован в [4, 7]. Ряд существенных результатов и в этом случае удастся качественно, а иногда и количественно воспроизвести непосредственно из простых физических соображений. В частности, выяснено, что колебательный режим потери устойчивости связан со специфическим взаимодействием "испарительного" механизма с рассмотренной в разделе 2 антиконвекцией Веландера "дивергентного" типа.

Чтобы пояснить это, вернемся к описанию механизма усиления за счет эффектов испарения "холодного пятна" у поверхности воды. К этому описанию следует добавить, что в охлажденной, более плотной, чем окружение, воде, вообще говоря, естественно возникновение нисходящих по вертикали и одновременно сходящихся по горизонтали течений (рис. 2). Видно, что вблизи границы раздела горизонтальные составляющие возникающих в воде течений могут быть направлены навстречу движениям воздуха. За счет вязкости движения воздуха при этом, как показывают оценки и точные расчеты, в некоторых случаях могут быть "повернуты вспять". В этих случаях и возможен колебательный режим развития неустойчивости. Смена знака течений в воздухе означает в данном случае возникновение в нем восходящих движений, увеличение влажности воздуха у поверхности, уменьшение испарения и, как следствие, смену охлаждения поверхности воды на ее нагрев. Нагрев означает изменение направления течений в воде, кото-

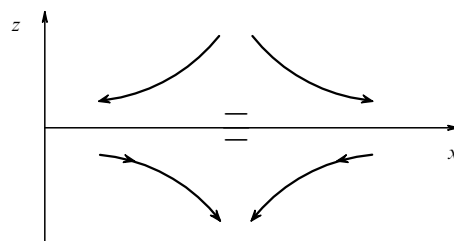


Рис. 2. Схематическое изображение одной из возможных картин движения вблизи охлажденного участка границы раздела. Одновременные нисходящие движения в обеих средах при их охлаждении означают наличие встречных течений вблизи границы раздела. Это может приводить к колебательному режиму развития неустойчивости.

рые, в свою очередь, могут снова "повернуть вспять" горизонтальные течения в воздухе и т.д. В воздухе над твердой увлажненной поверхностью этот механизм возникновения колебаний, очевидно, должен отсутствовать. И, действительно, строгий анализ устойчивости дает в последнем случае только монотонный рост возмущений [7, 9].

5. Воздух над соленой водой — еще один механизм антиконвекции

В геофизических приложениях существенную роль могут играть соленостные эффекты в воде.

Вернемся к описанному в предыдущем разделе "испарительному" механизму неустойчивости. Выше упоминалось, что для его реализации необходима достаточно сильная "влажностная неравновесность" системы — достаточно большой фоновый вертикальный поток влаги, т.е. сильная фоновая стратификация по влажности. В противном случае при охлаждении участка поверхности воды испарение с него не увеличивается, а уменьшается и описанная выше положительная обратная связь отсутствует.

Но если вода соленая, то упомянутое уменьшение испарения означает возникновение отрицательного возмущения солености под "холодным пятном" на поверхности. Менее соленая вода — менее плотная. Правда, в области "холодного пятна" имеется и фактор, действующий в противоположную сторону: плотность воды растет с ее охлаждением. Здесь охлаждение воды и ее "распреснение" изменяют ее плотность в противоположные стороны. Анализ [8] показывает, что для некоторого интервала горизонтальных масштабов возмущений при реальных значениях солености морской воды распреснение воды может влиять на ее плотность более существенно, т.е. в области "холодного пятна" плотность воды может быть меньше фоновой. Тогда в этой более легкой воде возникают восходящие движения, которые приносят снизу к поверхности более холодную воду. Это приводит к дальнейшему охлаждению "холодного пятна", уменьшению испарения, дальнейшему уменьшению солености, усилению восходящих движений под "холодным пятном" и т.д. Анализ гидродинамической устойчивости [8] показал, что такой механизм положительной обратной связи может быть весьма эффективным.

6. Термокапиллярная антиконвекция

В заключение остановимся на механизме, который может реализоваться при наличии заметного термокапиллярного эффекта на границе раздела. Пусть опять на этой границе имеется "холодное пятно". Вследствие термокапиллярного эффекта у границы раздела в области "холодного пятна" возникнут сходящиеся горизонтальные течения как в нижней, так (вследствие вязкости) и в верхней среде. В силу неразрывности в верхней среде над "холодным пятном" возникнут восходящие движения. Восходящие движения в системе, охлаждаемой снизу, приводят к понижению температуры. Это, в свою очередь, означает интенсификацию "холодного пятна", усиление сходящихся горизонтальных течений и т.д. Этот механизм антиконвекции и его взаимодействие с вельандеровским механизмом исследованы в [10].

7. Заключение

Итак, в двухслойных системах имеется целый ряд нетривиальных механизмов, приводящих к возникновению конвективной неустойчивости при нагреве сверху, т.е. при устойчивой стратификации обеих сред.

Отметим принципиальное отличие от классической рэлеевской конвекции, при которой условия возникновения неустойчивости лишь количественно зависят от длины волны возмущения. В нагреваемой сверху двухслойной системе для волн различной длины на передний план могут выходить различные физические механизмы

неустойчивости. Для одних мод более существенна "термическая" неравновесность системы, для других — "влажностная", для третьих — солёностные эффекты. Поэтому динамика различных неустойчивых мод может качественно различаться. Например, развитие неустойчивости может быть монотонным, либо осциллирующим.

В заключение отметим, что исследование антиконвекции пока ограничивается теорией, а теория, как правило, — линейным анализом гидродинамической устойчивости.

Автор глубоко признателен О.В. Перестенко, совместная работа с которым привела к прояснению большинства рассмотренных выше вопросов.

Список литературы

1. Welander P *Tellus* **16** 349 (1964)
2. Гершуни Г З, Жуховицкий Е М *Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа* (6) 28 (1980)
3. Ингель Л Х, Стогова И В *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана* **23** 1120 (1987)
4. Perestenko O V, Ingel L Kh *J. Fluid Mech.* **287** 1 (1995)
5. Перестенко О В, Ингель Л Х *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана* **27** 408 (1991)
6. Ингель Л Х, Перестенко О В *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана* **28** 45 (1992)
7. Perestenko O V, Ingel L Kh *Bound.-Layer Meteorol.* **78** 383 (1996)
8. Ингель Л Х, Перестенко О В *ДАН* (1997) (в печати)
9. Перестенко О В, Ингель Л Х *ДАН* **333** 92 (1993)
10. Перестенко О В *Письма в ЖТФ* **18** 5 (1992)

'Anticonvection'

L. Kh. Ingel

*Institute of Experimental Meteorology, SPA "Typhoon",
prosp. Lenina 82, Obninsk, Kaluga Region 249020, Russia
Tel. (7-08439) 7-13 21
Fax (7-08439) 4-09 10
E-mail: typhoon@storm.iasnet.com*

A convective instability in a system of two immiscible liquids under gravity may arise not only from heating from below but also as a result of a horizontally uniform heating from above, i.e., with either liquid exhibiting a stable stratification. Some recently discovered mechanisms of such instability are discussed.

PACS numbers: **44.25. + f**, 47.20.Bp

Bibliography — 10 references

Received 3 December 1996