ОБ ЭФФЕКТЕ ОБРАЩЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ КОНВЕКЦИИ ПРИ ТУРБУЛИЗАЦИИ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЖИДКОСТИ

Л.Х. Ингель lev.ingel@gmail.com

НПО "Тайфун", Россия, Обнинск
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва

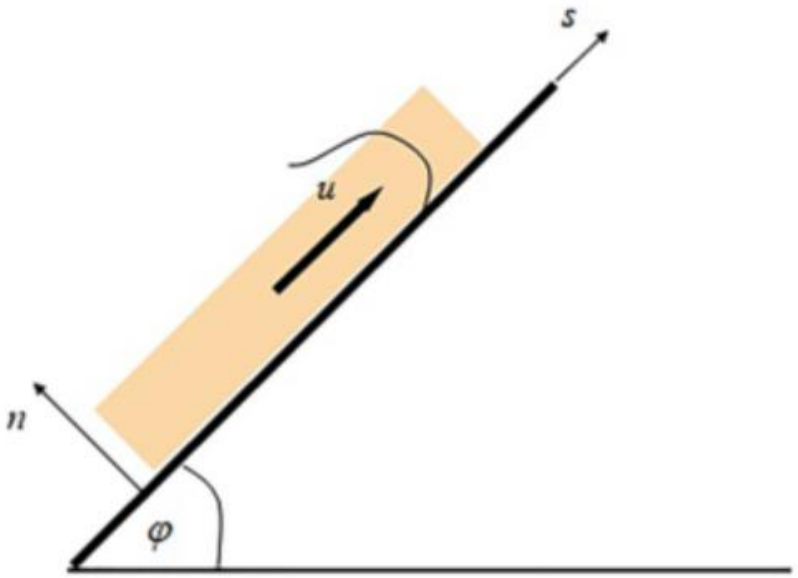
Как хорошо известно, гидротермодинамике двухкомпонентных жидких/газообразных сред (таких как, например, соленая морская вода) присущ целый ряд нетривиальных особенностей. В настоящем докладе обращается внимание на еще один эффект, возникающий при турбулизации течений таких сред.

Ряд нетривиальных свойств двухкомпонентных сред связан с различием значений коэффициентов обмена двух субстанций. Например, при молекулярном обмене коэффициент переноса тепла на два порядка больше чем соли, вследствие чего, как известно, возникают специфические классы конвективной неустойчивости двухкомпонентной среды.

Ниже рассматривается ситуация, когда развитие конвективного течения постепенно приводит к его турбулизации.

Идея настоящей работы заключается в том, что турбулизация резко меняет эффективность переноса двух субстанций – соотношение между эффективными коэффициентами переноса двух субстанций существенно меняется. Тем самым, резко меняются условия развития двухкомпонентной конвекции, например, конвекция может менять направление.

В качестве примера рассматривается модель развития конвекции в соленой воде над бесконечной плоской наклонной поверхностью, на которой задаются стационарные (после включения в начальный момент времени $t = 0$) отклонения потоков тепла и концентрации примеси (соли).



Отклонение плотности среды:

$$\rho = \rho_0 \left[1 - \alpha T + \beta S \right]$$

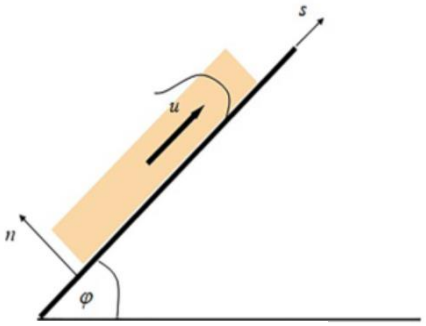
(T, S – отклонения температуры
и солености соответственно)

Схематическое изображение течения у наклонной стенки в области положительного отклонения плавучести (упомянутая область затушевана)

Для простоты рассматривается случай отсутствия фоновых стратификаций температуры и концентрации примеси. Иными словами, в начальный момент среда не только находится в состоянии покоя, но и однородна по температуре, солености и плотности. Исследуются конвективные течения, вызываемые в такой среде постоянными (после «включения» в момент $t = 0$) отклонениями потоков тепла и примеси на нижней наклонной границе . Поскольку задаваемые на границе возмущения не зависят от координаты вдоль склона s, будем искать не зависящие от s решения.

Система уравнений: $$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} + g(\alpha T - \beta S)\sin\varphi = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial n^2} + gb\sin\varphi,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \frac{\partial^2 T}{\partial n^2}, \qquad \frac{\partial S}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 S}{\partial n^2}, \qquad b = \alpha T - \beta S$$



Здесь · · u · –· скорость· течения· вдоль· склона· (другие· компоненты· скорости· в· данной· задаче· отсутствуют),· · t · –· время;· ν, κ, χ · –· коэффициенты· переноса,· φ · –· угол· наклона· нижней· границы·к·горизонту,· g –·ускорение·силы·тяжести;·¶

$$b = \alpha T - \beta S$$

–·безразмерная·плавучесть.·Подчеркнем,·что·полная·система·уравнений·гидротермодинамики·и· переноса·примеси·свелась·к·линейной·системе·(2)·–·(3)·только·за·счет·симметрии·задачи,·без· каких-либо·предположений·о·малости·амплитуд·возмущений.¶

В качестве краевых условий предполагается, прежде всего, затухание возмущений вдали от нижней границы:

$$\vec{u},\ \vec{T},\ \vec{S} \to 0, \quad \text{при } n \to \infty.$$

На границе $n = 0$ выполняется условие прилипания $u = 0$. Для температуры и концентрации примеси рассматриваются краевые условия второго рода:

$$c\rho_0\kappa\frac{\partial T}{\partial n} = Q\eta(t), \qquad \rho_0\chi\frac{\partial S}{\partial n} = \Theta\eta(t) \quad \text{при } n = 0.$$

где c - теплоемкость среды, $\eta(t)$ – единичная функция Хевисайда; Q, Θ – соответствующие амплитуды.

Решение выражается через кратные интегралы вероятностей и подробно изложено в недавно вышедшей работе [1].

В качестве примера, остановимся на случае, когда соленая вода охлаждается и одновременно распресняется от нижней наклонной границы. Фактор охлаждения добавляет в среду отрицательную плавучесть, распреснение – положительную. Предположим, что второй фактор существенно преобладает по абсолютной величине: положительной плавучести вносится значительно больше, чем отрицательной. На первый взгляд, в итоге в среде должно возникать восходящее течение вдоль склона. Но в полученном решении результаты сильно зависят и от соотношения коэффициентов переноса для разных субстанций. Поскольку коэффициент обмена для соли относительно мал $(\chi << \kappa)$, распресненная область медленно проникает в среду по сравнению с расширением охлажденного слоя. Будучи более тонким, распресненный слой сильно подвержен вязкости. Поэтому связанные с ним восходящие движения, сильно тормозятся вязкостью, в отличие от нисходящих движений в относительно толстом охлажденном слое. Это обстоятельство действует в сторону, противоположную соотношению притоков плавучести. В результате оказывается, что, несмотря на преобладание притока положительной плавучести, склоновое течение может быть преимущественно нисходящим.

По мере притока в среду двух составляющих плавучести, толщина области склонового течения, как и скорость, в данной постановке задачи неограниченно увеличиваются. Следовательно, возрастает число Рейнольдса, и предстоит турбулизация течения.

Эффективные коэффициенты турбулентного обмена для всех субстанций обычно предполагаются примерно одинаковыми. Таким образом, исчезает тот фактор различия коэффициентов переноса, который при молекулярном обмене, несмотря на положительный в целом приток плавучести, приводил к возникновению нисходящего склонового течения. Одинаковым коэффициентам обмена отвечает уже восходящее в целом течение. **Таким образом, турбулизация течения приводит к изменению его направления.**

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Найденное решение демонстрирует нетривиальное свойство естественной конвекции в двухкомпонентных средах: поступление в среду положительной плавучести может приводить к возникновению нисходящих движений, и наоборот – восходящие движения могут возникать несмотря на приток отрицательной плавучести. Это существенно зависит от соотношения коэффициентов обмена разных субстанций. Такими свойствами обладает, в частности, рассмотренное склоновое течение. Из выполненного анализа следует, что направление конвективного течения может радикально меняться при турбулизации этого течения, поскольку при этом меняется соотношение эффективных коэффициентов обмена.

Литература

1. *Ингель Л.Х.* Об эффекте обращения направления конвекции при турбулизации двухкомпонентной жидкости // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2026. Т. 19, № 2. С. 19–25. https://doi.org/10.59887/2073-6673.2026.19(2)-2