

# **ПРИРОДА**

№ 7, 2000 г.

**В.Д. Селезнев и др.**

## **Аномальная неустойчивость при смешении газов в вертикальном канале**

(с) “Природа”

*Использование или распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции*

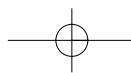


Образовательный сетевой выпуск  
**VIVOS VOCO! - ЗОВУ ЖИВЫХ!**

<http://vivovoco.nns.ru>

<http://vivovoco.rsl.ru>

<http://www.ibmh.msk.su/vivovoco>



# Аномальная неустойчивость при смешении газов в вертикальном канале

В.Д.Селезнев, А.В.Мелких, О.Е.Александров, В.Н.Косов

Если в сосуде разместить две жидкости (или два газа) так, что более плотная среда будет находиться сверху, то в такой системе механическое равновесие, как правило будет неустойчивым. В ней может возникнуть гравитационная конвекция, при которой тяжелая жидкость будет опускаться, а более легкая — подниматься. Причины такого поведения легко понять: для капли тяжелой жидкости, находящейся в менее плотной среде, выталкивающая сила Архимеда меньше силы тяжести. В результате капля будет опускаться вниз. После того как менее плотная жидкость займет верхнее положение, в системе установится уже устойчивое механическое равновесие.

## Трехкомпонентные смеси спутывают карты

Однако в опытах по смешению *трехкомпонентной* смеси газов было обнаружено явление, противоречащее привычным представлениям<sup>1</sup>. Авторы измеряли скорости *диффузионного* выравнивания концентраций в вертикальной цилиндриче-



**Владимир Дмитриевич Селезнев**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой молекулярной физики Уральского государственного технического университета. Область научных интересов — неравновесная статистическая термодинамика, процессы взаимодействия на границе газ—твердое тело.



**Алексей Вениаминович Мелких**, кандидат физико-математических наук, доцент той же кафедры. Занимается проблемами неустойчивости процессов переноса в различных средах.

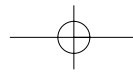


**Олег Евгеньевич Александров**, кандидат физико-математических наук, доцент той же кафедры. Занимается механикой сплошных сред и взаимодействием газа с поверхностью.



**Владимир Николаевич Косов**, доктор физико-математических наук, заведующий кафедрой физики Алма-Атинского государственного университета (Казахстан). Область научных интересов — диффузия в многокомпонентных смесях, диффузионная неустойчивость.

<sup>1</sup> Miller L., Mason E.A. // Phys. Fluids. 1966. V.9. №4. P.711—721; Miller L., Spurling T.H., Mason E.A. // Ibid. 1967. V.10. №8. P.1806—1811; Ивакин Б.А., Суетин П.Е., Харин Г.С. // Тр. УПИ. 1969. №172. С.154—156.



## МЕХАНИКА

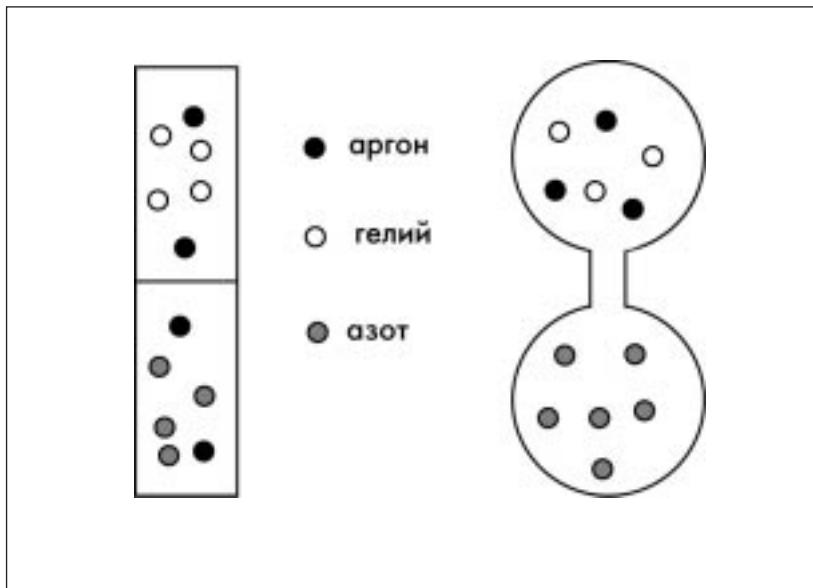


Рис.1. Трубка Лoшмидта и система колб, соединенных капилляром.

ской трубке с расположенной в центре диафрагмой, которая разделяет смешиваемые компоненты до начала диффузии (трубка Лoшмидта, рис.1).

Чтобы избежать гравитационной конвекции, верхнюю часть трубки заполняли самым легким газом, нижнюю — газом средней плотности, а самый тяжелый компонент равномерно распределяли по всей системе. После того как диафрагму раздвигали, газы из верхней и нижней частей трубки начинали смешиваться. Именно в этих условиях, устойчивых по градиенту плотности, было зафиксировано возникновение *конвекции*.

Срыв диффузионного режима смещения заметили по неожиданному возникновению колебаний температуры газа. Последующая визуализация массопереноса<sup>2</sup> в аналогичных условиях позволила зафиксировать конвективные потоки. В ходе дальнейшего изучения выяснилось:

- аномальная неустойчивость

<sup>2</sup> Трубку со смесью освещали светом, на пути луча за трубкой ставили нож и наблюдали за его тенью на экране — тень размывалась из-за неоднородного преломления в среде с конвекцией.

возникает только при наличии третьего компонента, в бинарных смесях эффект отсутствует;

- для срыва механического равновесия необходимо, чтобы в верхней части трубки присутствовал тяжелый компонент;

- наиболее ярко эффект проявляется в смесях с большими различиями в значениях коэффициентов диффузии и молекулярных масс компонентов.

При интерпретации обнаруженных закономерностей перед исследователями встали вопросы: каким образом возникает механическое движение при устойчивой стратификации плотности? Какие параметры определяют условие возникновения аномальной конвекции? Как протекает возникшее конвективное движение?

Рассмотрим более подробно эти и другие вопросы, связанные с наблюдаемой аномальной неустойчивостью трехкомпонентных газовых смесей. Для начала разберем причины возникновения традиционной гравитационной конвекции. Представим себе ситуацию, когда тяжелый газ находится сверху, а граница раздела — плоская и горизонтальная (рис.2а). Случайные гидродина-

мические возмущения могут привести к искажению плоской границы и появлению выступа, скажем, полусферического, радиуса  $r$ , заполненного тяжелым газом. С одной стороны, это возмущение должно рассасываться за счет поперечной диффузии, а с другой стороны — расти. Действительно, из-за нарушения равенства сил Архимеда и тяжести может начаться формирование полной «капли», которая затем будет падать вниз со скоростью, определяемой вязкостью среды. Какая из двух конкурирующих тенденций победит — покажет сравнение характерных времен указанных процессов.

Время диффузионного рассасывания  $\tau_D$  капли с характерным

размером  $r$  легко оценить, считая молекулы тяжелого газа броуновскими частицами. Среднее время, которое требуется им для смещения на расстояние  $r$ ,

$$\tau_D = r^2/2D \quad (1)$$

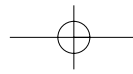
( $D$  — коэффициент диффузии броуновской частицы), и дает исковую оценку.

Чтобы найти характерное время организации тяжелой капли и ее смещения на расстояние  $r$ , будем полагать, что начальное механическое равновесие смеси характеризуется градиентом плотности  $d\rho_0/dz$ . Тогда при гид-

родинамическом возмущении, подобном волнам на поверхности жидкости, состав образующейся капли соответствует невозмущенному уровню  $z = 0$ , и плотность капли равна  $\rho_1$

$= \rho_0(z = 0)$ . Средняя же плотность окружающей каплю среды иная:  $\rho_2 = \rho_0(z = -r)$  (рис.2б).

Сформировавшись, капля отрывается и далее движется равномерно под действием сил Архимеда, тяжести и трения. Из условия уравнивания этих сил следует:



$$(\rho_1 - \rho_2)gV = 6\pi\eta ru, \quad (2)$$

где  $g$  — ускорение свободного падения,  $V$  — объем капли,  $\eta$  — вязкость,  $u$  — скорость движения капли.

Учитывая малое различие в величинах  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , их разность можно выразить через градиент невозмущенной плотности

$$\rho_1 - \rho_2 = r(dp_0/dz). \quad (3)$$

Тогда из (2) и (3) найдем характерное время смещения капли на величину ее радиуса

$$\tau_\eta = r/u = \frac{6\pi\eta r}{gV(dp_0/dz)}. \quad (4)$$

Формирование капли и последующее ее движение будет возможным, если за время перемещения на расстояние  $r$  она не успеет рассосаться благодаря диффузии, т.е. если  $\tau_D \gg \tau_\eta$ , или

$$\tau_D/\tau_\eta = \frac{gr^4(dp_0/dz)}{9\eta D} \gg 1. \quad (5)$$

Более строгое решение методами линейной теории возмущений показывает, что в рассматриваемой задаче поведение системы действительно характеризуется безразмерным параметром (5) — известным числом Релея  $R = (gr^4 dp_0/dz)/\eta D$ . Если устойчивое

механическое равновесие срывается, значит, это число превышает некоторое критическое (положительное) значение  $R_{кр}$ . Для бесконечного плоского вертикального канала  $R_{кр} = \pi^4$ ,

для бесконечного цилиндрического —  $R_{кр} = 68$ .

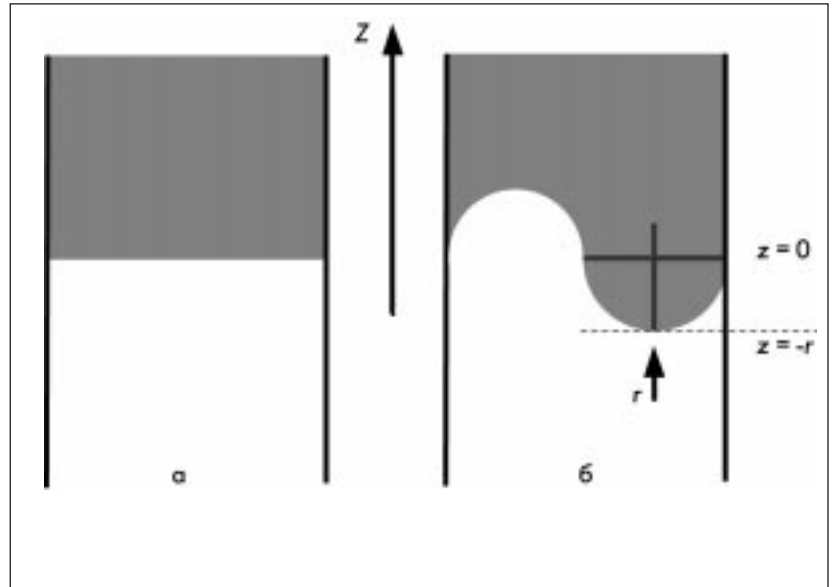


Рис.2. Образование капли в бинарной системе.

Таким образом, для появления неустойчивости необходимо не только, чтобы плотность вверху была больше, чем внизу, т.е. производная  $dp_0/dz$  была положительна, но и чтобы эта производная была достаточно велика:

$$dp_0/dz > \eta DR_{кр}/gr^4. \quad (6)$$

Парадоксальность опытов с трехкомпонентными смесями состоит в том, что неустойчивость возникает не только при нарушении последнего условия, но даже и при отрицательных значениях производных плотности по высоте ( $dp_0/dz < 0$ ).

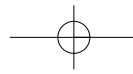
## Все новые загадки

В начале 80-х аномальной неустойчивостью заинтересовалась группа исследователей под руководством Ю.И.Жаврина<sup>3</sup>. Из-

мерялась скорость смешения в трехкомпонентных газовых системах. Опыт проводился в двух колбах, соединенных вертикальным капилляром (рис.1). Как правило, в верхней колбе размещали бинарную смесь самого легкого и самого тяжелого компонентов, а газ средней плотности находился в нижней колбе. Подбором концентраций в бинарной смеси всегда добивались меньшей плотности в верхней колбе. В отличие от трубки Лешмидта, в таких системах устойчивая диффузия протекает квазистационарно: сравнительно быстро устанавливается определенное распределение концентраций вдоль канала, которое затем очень медленно меняется по мере выравнивания концентраций компонентов в колбах.

Жаврин с сотрудниками обнаружили, что и в таких, квазистационарных, условиях тоже имеет место аномальная неустойчивость. Чтобы визуально наблюдать возникающую конвекцию, применили метод теней Теплера. В этом методе прямоугольный в сечении канал с прозрачными стенками освещается пучком света, лучи по-разному преломляются в конвектирующих слоях,

<sup>3</sup> Жаврин Ю.И., Косов Н.Д., Белов С.М., Тарасов С.Б. // ЖТФ. 1984. Т.54. №5. С.943—947.



## МЕХАНИКА

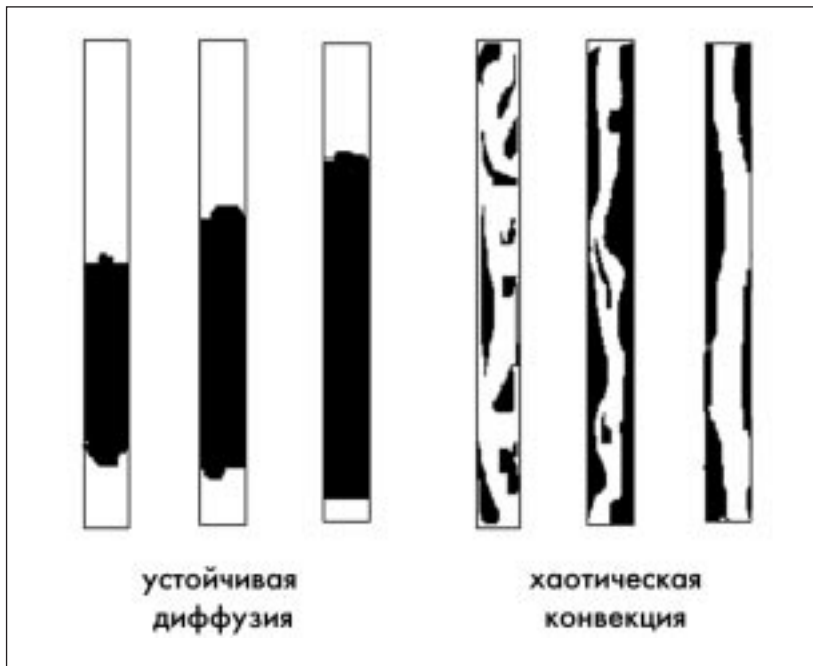


Рис.3. Различные режимы конвекции (снимки теней на экране за каналом).

что дает на экране позади канала неоднородную освещенность, изменяющуюся во времени.

В режиме устойчивой диффузии наблюдается однородная в перпендикулярном к оси канала направлении картина освещенности. По мере роста числа Релея сначала возникают стационарные

конвективные потоки (освещенность неоднородная, но не меняется во времени). Затем характер течения становится периодическим в пространстве и времени. И наконец, при достаточно больших значениях числа Релея он приобретает хаотический вид, картина на экране напоминает бушу-

ющий океан. Характерные теневые снимки, отражающие динамику процессов устойчивой и неустойчивой диффузии, приведены на рис.3.

Аналогичную смену режимов конвекции зарегистрировали также малоинерционные датчики — катарометры, которые определяют локальную теплопроводность газа. Теплопроводность смеси зависит от концентраций компонентов, что и дает возможность следить за их изменением во времени. Запись показаний катарометра позволила определить все характерные периоды происходящих процессов (рис.4).

Большую часть опытов проводили по классической схеме: верхнюю и нижнюю колбы заполняли смесями газов, добиваясь меньшей плотности в верхней колбе, а давление и температуру в колбах поддерживали одинаковыми. Затем капилляр открывали и время от времени регистрировали состав смеси в колбах с помощью хроматографа. По найденным концентрациям и времени с начала смешения вычисляли парциальные расходы каждого компонента (их удобно нормировать на величину расхода в условиях устойчивой диффузии при тех же давлении и температуре). Типичные зависимости рассчитанных таким об-

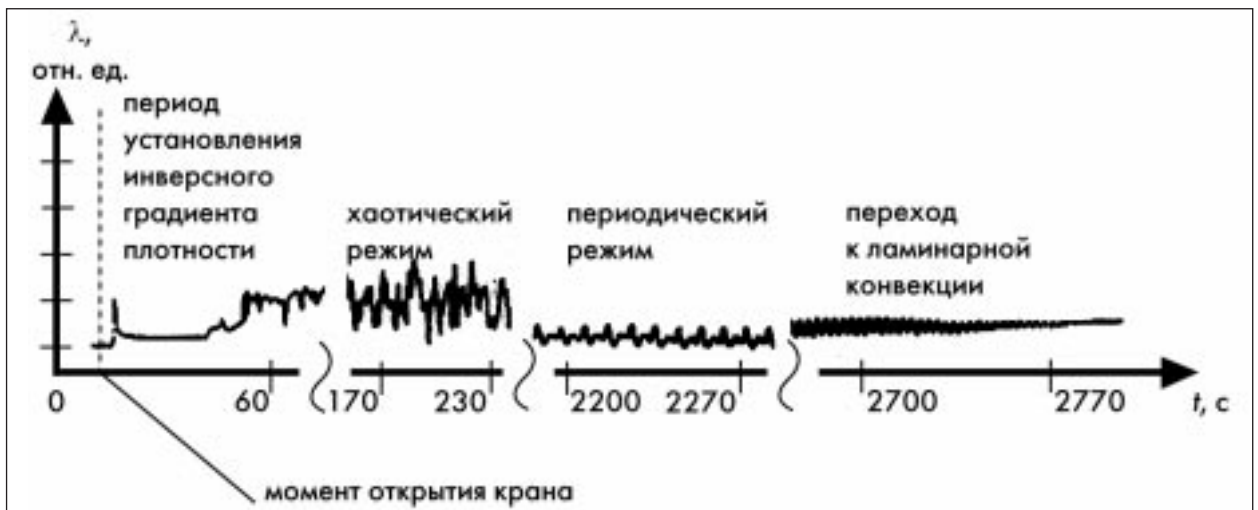
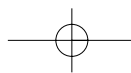


Рис.4. Изменение теплопроводности смеси во времени, иллюстрирующее смену режимов конвекции.



разом относительных величин  $\alpha_i$

от давления приведены на рис.5.

Удивительно то, что эффект существует в сравнительно узком диапазоне давлений. В отличие от классической неустойчивости, развивающейся в случае, когда более плотный газ находится вверху, здесь высокое давление приводит к подавлению аномальной конвекции. При варьировании диаметра канала и его наклона по отношению к вертикали на ряде смесей наблюдались совсем загадочные кривые  $\alpha_i(P)$  — с двумя максиму-

мами. Следует отметить, что в ряде случаев максимальные значения  $\alpha_i$  достигали 500, пока-

зывая возрастание массообмена благодаря возникающей конвекции в сотни раз по отношению к устойчивой диффузии.

Не вписывается в классические представления и такой зарегистрированный факт: конвекция возбуждается в одной и той же системе как при одном положении колб, так и при перевернутом.

В условиях смешения, когда два газа, самый легкий и самый тяжелый, в одинаковом количестве помещали в верхнюю колбу, а третий газ — в нижнюю, было обнаружено еще одно загадочное явление — эффект аномального разделения. Парциальный расход самого тяжелого газа через капилляр оказался в несколько раз больше расхода легкого газа. В условиях устойчивой диффузии через канал, наоборот, преимущественно проникает легкий компонент благодаря большей тепловой скорости молекул.

Когда стали проводить измерения состава не только на первом этапе перемешивания, но проследили за процессом почти до полного выравнивания концентраций в колбах, для ряда смесей зарегистрировали совсем уж трудно объяснимую многократную смену режимов — несколько переходов от конвекции

к устойчивой диффузии и обратно.

Анализ опытных данных по квазистационарному смешению в системе двух колб показал, что, как и в нестационарных условиях, наиболее ярко все перечисленные эффекты проявляются на смесях, в которых коэффициенты диффузии и массы молекул у разных компонентов сильно различаются. Если концентрация третьего компонента в системе становится исчезающе малой, перечисленные аномалии исчезают.

## Объясняет линейная теория

Несмотря на кажущуюся парадоксальность вышеописанных эффектов, их все же можно объяснить<sup>4</sup>. Прежде всего надо учесть, что в трехкомпонентных системах мы имеем уже две независимые термодинамические силы (перепады концентраций между колбами) вместо одной для бинарной смеси.

<sup>4</sup> Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И. // Журн. техн. физики. 1997. Т.67. №10. С.139—140; Они же // Там же. 1998. Т.68. №5. С.14—17.

Применение линейной теории возмущений к системе уравнений механики сплошных сред трехкомпонентного состава показало, что причиной парадокса устойчивости действительно может служить дополнительная степень свободы («лишний» перепад концентрации). Физический механизм аномальной неустойчивости можно понять на примере смеси аргона с гелием в верхней колбе и азота в нижней. Гидродинамическое возмущение плоской границы раздела (см. рис.2) приводит к образованию выступа, в котором концентрации He и Ar окажутся выше, чем в других местах соответствующего горизонтального слоя. Возникнет диффузия атомов в поперечных направлениях, причем атомы He, как более подвижные, будут покидать выступ быстрее, чем атомы Ar, поэтому плотность выступа может превысить плотность окружения. В таком случае образуется капля, которая начнет опускаться. Как и упоминалось, одним из решающих факторов возникновения аномальной неустойчивости оказывается большое различие в значениях коэффициентов диффузии компонентов, это же

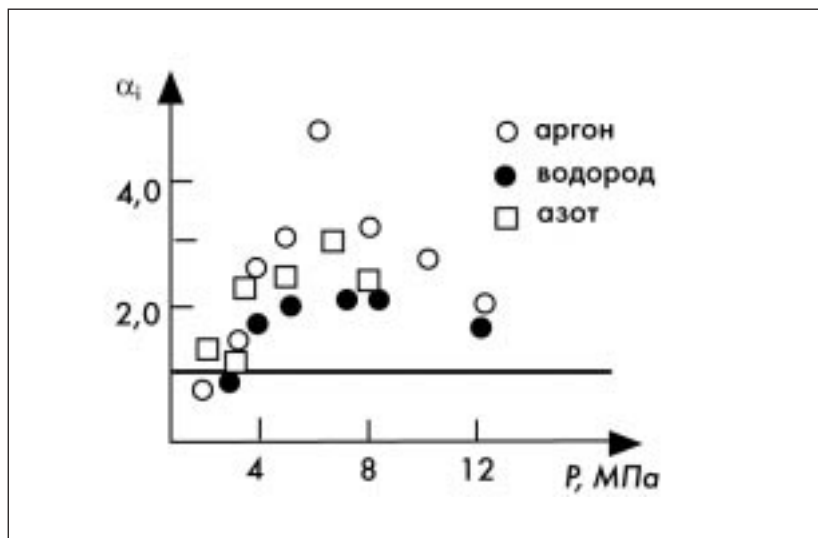
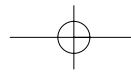


Рис.5. Значения расходов для различных компонентов смеси  $\alpha_i$ , нормированные на расчетный расход в условиях равновесия, при изменении давления. Когда  $\alpha_i$  превышает единицу, механическое равновесие нарушается.





## МЕХАНИКА

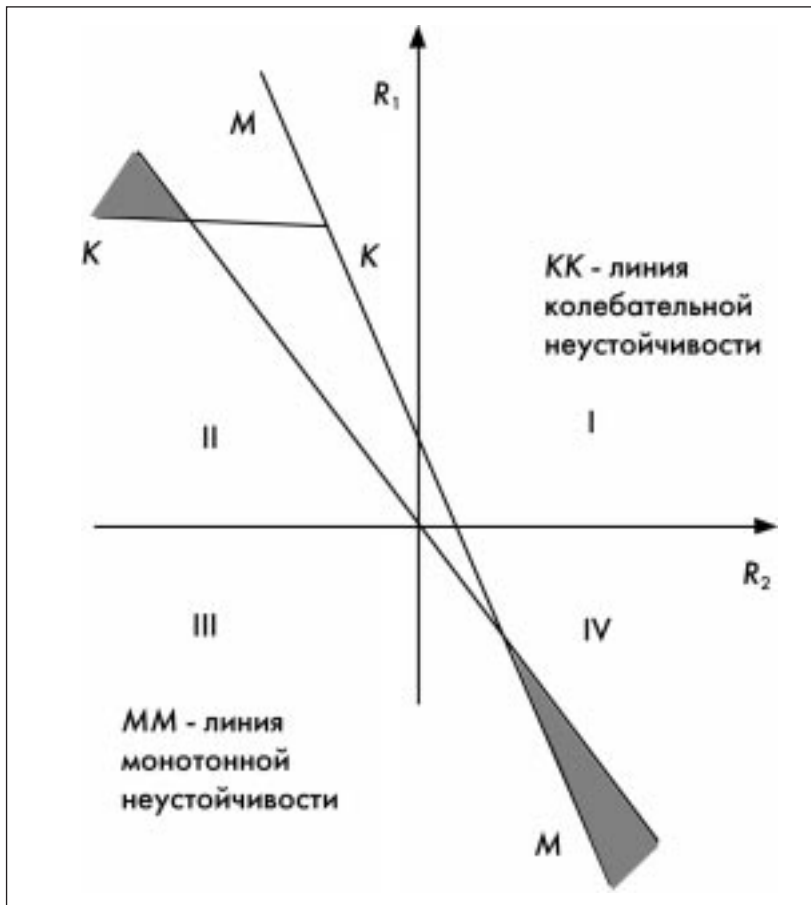


Рис.6. Диаграмма устойчивости трехкомпонентной системы на плоскости парциальных чисел Релея  $R_1, R_2$ . Выше линии  $MM$  конвективный поток в системе стационарный; выше полубесконечной линии  $KK$  режим конвекции периодический. Прямая, проходящая через начало координат, делит плоскость на области с отрицательным (ниже прямой) и положительным градиентом плотности  $dp/dz$ . Заштрихованные участки отвечают условиям аномальной конвекции.

отмечено и в опытах.

На языке математического описания трехкомпонентной диффузии и конвекции система характеризуется не одним, а двумя числами Релея, которые пропорциональны двум независимым градиентам концентрации компонентов:

$$R_1 = \frac{gr^4 n(m_1 - m_3)}{\eta D_{11}} (dc_1/dz),$$

$$R_2 = \frac{gr^4 n(m_2 - m_3)}{\eta D_{22}} (dc_2/dz),$$

где  $m_i$  — масса молекул,  $D_{ii}$  — эффективные коэффициенты диффузии компонентов и  $n$  — числовой плотность смеси (общее число атомов или молекул смеси в единице объема).

Если для бинарной смеси область устойчивости системы представлена левой частью оси значений  $R$ , где  $R \leq R_{sp}$ , то для

трехкомпонентной смеси область устойчивости нужно искать на двумерной плоскости парциальных чисел Релея. Условие критичности задает линия

$f(R_1, R_2) = 0$ . Оказалось, что линии монотонной ( $MM$ ) и колебательной ( $KK$ ) неустойчивостей (в линейном приближении это прямые) расположены на плоскости  $(R_1, R_2)$ , как изображено на рис.6. Ниже обеих этих линий механическое равновесие устойчиво, выше — неустойчиво.

Поскольку плотность связана с концентрациями компонентов  $c_i$  очевидными соотношениями

$$\begin{aligned} \rho &= n \cdot (c_1 m_1 + c_2 m_2 + c_3 m_3) = \\ &= n \cdot (c_1(m_1 - m_3) + c_2(m_2 - m_3) + m_3) = \\ &= n \cdot (c_1 \Delta m_1 + c_2 \Delta m_2 + m_3), \end{aligned}$$

легко найти условие обращения в нуль градиента полной плотности смеси

$$\begin{aligned} dp/dz &= n (\Delta m_1 (dc_1/dz) + \\ &+ \Delta m_2 (dc_2/dz)) = 0. \end{aligned}$$

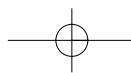
В координатах  $(R_1, R_2)$  это условие с учетом (7) определяет прямую линию, проходящую через начало координат (рис.6). Ниже этой линии градиент плотности отрицателен.

Анализируя рис.6, легко обнаружить области с отрицательным градиентом плотности, но лежащие выше линий неустойчивости  $MM$  или  $KK$ . На рис.6 эти области заштрихованы. Если условия эксперимента подобрать так, что система окажется в данных областях, должна наблюдаться аномальная конвекция.

В частности, становится понятным опыт с переворачиванием двух колб. Переворот соответствует на плоскости  $(R_1, R_2)$  переходу системы из IV квадранта во II, в котором также существует область неустойчивости.

Двугорбый характер зависимости расхода  $\alpha$ , от диаметра ка-

нала, по-видимому, связан с тем, что внутри него возможно одновременное существование не только двух встречных конвек-



тивных потоков, но и большего их числа (это также подтверждается теорией).

## Не все так просто

Однако в ряде экспериментов, когда коэффициенты диффузии различались особенно сильно (например, в смеси гелия, фреона, аргона), опытные данные по положению границ устойчивости не согласовались с теоретическими предсказаниями. Наглядно это продемонстрировали эксперименты с балластным газом, в которых тяжелый газ размещался в колбах в одинаковом количестве, при этом  $dc_2/dz$  и, следовательно,  $R_2$  были равны нулю. Точки, соответствующие условиям опыта, находятся на отрицательном участке оси  $R_1$ . Линии неустойчивостей  $MM$  и  $KK$  по теории пересекают только положительную ветвь оси  $R_1$ , а реально переход в неустойчивое состояние может происходить на ее отрицательной части.

Анализ этого противоречия выявил одну неточность в постановке задачи устойчивости трехкомпонентной смеси. Сделанное предположение о линейном распределении концентраций компонентов и плотности смеси вдоль канала в невозмущенной системе на самом деле неправомерно. После открытия капилляра за время  $\sim L^2/D$  ( $L$  — длина канала) в нем устанавливается некоторое квазистационарное распределение концентраций по длине. В бинарной смеси это распределение действительно строго линейно, но в трехкомпонентной смеси с большим различием в значениях коэффициентов диффузии — может стать существенно нелинейным. Например, — из-за диффузионного бароэффекта, возникающего в замкнутой системе двух колб вследствие различной подвижности молекул смешиваемых компонентов. Более того, теоретический анализ характера квазистационарного распределения плотности по длине канала

в трехкомпонентной системе при устойчивой диффузии показал, что может иметь место локальная инверсия градиента плотности<sup>5</sup>. Другими словами, хотя общий перепад плотности вдоль канала отрицателен, в отдельных его областях градиент положительен. Именно эти области и критичны с точки зрения возникновения аномальной конвекции. Учет возможной инверсии градиента плотности позволил снять основные качественные расхождения теории и эксперимента по положению границ устойчивости.

Однако линейная теория устойчивости отвечает только на вопрос: будет расти случайное возмущение при заданных условиях опыта или угасать? Никаких сведений об эволюции неустойчивости или о характере уже развитой конвекции здесь получить нельзя. Чтобы понять, каким образом растущее возмущение превращается в конвективную структуру — монотонную, пульсирующую или хаотизированную — необходимо решить систему газодинамических уравнений для трехкомпонентной смеси без предположения о малости возмущений. В общем случае такая задача слишком сложна, и из-за этого остается невыясненным целый ряд вопросов. Как конвекция, возникшая в опасной области капилляра, где градиент плотности положителен, распространяется на область, где этот градиент отрицателен? Почему и как происходит смена режимов конвекции — с монотонного на пульсирующий, с пульсирующего на хаотический? Каковы механизмы аномального разделения и неоднократного перехода от конвективной к устойчивой диффузии? Почему достаточно высокие давления подавляют конвекцию? На некоторые из этих вопросов можно попытаться ответить, опираясь на упрощенные модели ста-

ционарного переноса смесей.

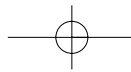
Например, отвлекаясь от причин конвективного движения, можно представить себе, что в канале организовано *стационарное* встречное движение смеси (50%Ar+50%He) и однокомпонентного газа ( $N_2$ ). Сравнительно простое аналитическое решение этой задачи показывает, что в таких условиях действительно происходит аномальное разделение смеси (Ar+He). Причина в низкой подвижности атомов Ar: они практически не проникают во встречный поток  $N_2$ , в то время как атомы He проходят в него и возвращаются с конвективным потоком в ту колбу, в которой они находились первоначально.

Ориентируясь именно на такой механизм протекания аномальной конвекции, нетрудно понять, почему при наличии инверсии градиента плотности только в малой части канала конвекция может распространиться на всю его длину. Действительно, начало конвективного движения в верхней области канала, где положительный градиент плотности максимален, будет сопровождаться аномальным разделением, которое утяжеляет возникшую «каплю», удаляя из нее молекулы легкого компонента, и она будет продолжать падать вниз. Этот механизм «усиления» возникшей конвекции работает только в том случае, если за время прохождения канала со скоростью конвекции «капля» успеет освободиться от легких молекул. Очевидно также: повышая давление, можно настолько притормозить скорость поперечной диффузии, что «усиление» перестанет «работать» и аномальная конвекция начнет затухать, как и показывает эксперимент.

Тот факт, что процесс смешения бинарной смеси самого легкого и самого тяжелого компонентов с третьим газом промежуточной массы сопровождается аномальным разделением, помогает понять, хотя бы качественно, и эффект неоднократной смены режимов перемешивания.

<sup>5</sup> Косов В.Н., Селезнев В.Д., Жаврин Ю.И. // Теплофизика и аэромеханика. 1998. Т.5. №2. С.209 — 214.





## МЕХАНИКА

Действительно, на первом этапе в процессе аномального разделения в нижнюю колбу поступает преимущественно тяжелый компонент. Это снижает его содержание в верхней колбе до уровня, при котором процесс перемешивания становится устойчивым. Но при устойчивой диффузии (отсутствие конвекции) в нижнюю колбу преимущественно проникает легкий компонент, и постепенное уменьшение его концентрации в верхней колбе восстанавливает перепад плотности смеси до значения, при котором конвекция может снова возникнуть.

Итак, насколько мы продвинулись в понимании закономерностей аномальной неустойчивости трехкомпонентных смесей газов? Линейная теория возмущений, учитывающая инверсию градиента плотности, вполне адекватно объясняет экспериментально наблюдаемые грани-

цы устойчивости механического равновесия на плоскости парциальных чисел Релея. Однако переход к развитой конвекции, как и сам ее характер, остается предметом дальнейших исследований. Не изучены пока ни экспериментально, ни теоретически условия смены режимов конвекции: монотонный → осциллирующий → хаотический.

В настоящее время этап чисто экспериментального изучения явления плавно переходит в стадию, когда теория, отвечая на некоторые вопросы о механизмах конвекции, диктует план дальнейших целенаправленных опытов. В перспективе на примере описанного эффекта можно будет перейти к исследованию общих закономерностей переходов между конкурирующими режимами различных неравновесных неустойчивых процессов.

**Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Грант 98-01-00879. ■**

## Коротко

В докладе Международной консалтинговой компании по использованию энергии ветра (Wind Force 10: A Blueprint to Achieve 10% of the World's Electricity Wind Power by 2020) дается прогноз: к 2020 г. ветровые энергоустановки смогут удовлетворить 10% мировой потребности в электроэнергии. Это в свою очередь предотвратит выброс в атмосферу 10 млрд т парниковых газов. Об экономической выгоде свидетельствует опыт Дании, которая уже получает от подобных установок 10% потребляемой электроэнергии.

По расчетам авторов доклада, стоимость электроэнергии, вырабатываемой ветровыми энергоустановками, будет снижаться от 4.7 цента за один киловатт/час в настоящее время до 2.5 цента к 2020 г.

Environmental science and Technology. 2000. V.34. №1. P.17A (США).

Во время холодной войны ЦРУ

США использовало спутники-шпионы для картографирования Антарктиды. В 1995 г. было принято решение рассекретить снимки, сделанные до 1972 г. Сопоставление этих исключительно интересных материалов с более поздними космическими снимками позволяет проследить эволюцию трещин в ледниковом щите материка и рассчитать скорость движения льдов. Вероятно, снимки, выполненные после 1972 г., тоже будут представлены гляциологам, что поможет оценить воздействие глобального потепления на ледниковый покров Антарктиды.

Science et Vie. 1999. №986. P.28 (Франция).

Необычное явление вызвал ураган Флойд, перемещавшийся вдоль Атлантического побережья США: в проливе у о.Пимлико океанские воды превратились во вспененную массу, лишенную кислорода. По мнению специалистов, причиной могли стать чрезвычайно обильные дожди: тонны пресной

воды, содержавшей какие-то загрязнители, попали в океан. Они-то и способствовали бурному развитию морских водорослей, поглотивших растворенный кислород. Terre Sauvage. 1999. №145. P.26 (Франция).

Ледник Льюиса, расположенный на территории Кении, менее чем в 20 км от экватора, — крупнейший в Африке. Сегодня он занимает площадь 0.25 км<sup>2</sup>. Постоянные с 1980 г. измерения баланса его массы показали, что она неуклонно сокращалась (за исключением 1989 г.). Например, в 1988 г. средняя толщина стаявшего льда составила примерно 2 м.

К сожалению, с 1997 г. политическая ситуация в Кении не позволяет гляциологам продолжать эти уникальные для Африки исследования.

Science et Vie. 1999. №986. P.124 (Франция).