

О механизме некоалесценции в капельном кластере

А. А. Федорец¹⁾

Тюменский государственный университет, 625003 Тюмень, Россия

Поступила в редакцию 13 декабря 2004 г.

После переработки 9 марта 2005 г.

Приводятся экспериментальные данные, согласно которым механизм некоалесценции в капельном кластере не связан с электростатическими зарядами и поверхностно-активными веществами, а сила Стокса, действующая на капли кластера в конвективном факеле, составляет десятые доли процента веса капли. Описываются новые эффекты, свидетельствующие о быстром вращении капель кластера. Делаются оценки, позволяющие объяснить вращение капель с позиций термокапиллярной гипотезы некоалесценции.

PACS: 44.25.+f, 47.55.Dz

Исследования капельных кластеров [1, 2] находятся на стадии становления, впрочем, уже сейчас прослеживается несколько направлений, в которых их результаты могут быть актуальны и востребованы. Во-первых, каждая капля в кластере – это диссипативная структура нового типа, а кластер в целом – диссипативная сверхструктура²⁾. Во-вторых, явление служит основой принципиально новых методов сверхточного дозирования жидкостей [3] и визуализации течений жидкости и газа [4]. В-третьих, процессы в капельном кластере необходимо учитывать при решении ряда теплофизических, физико-химических и др. задач. В-четвертых, прослеживается любопытная аналогия: подобно атомам в кристалле, капли в кластере располагаются на определенном расстоянии, при увеличении которого они стремятся сблизиться, при уменьшении – отталкиваются. Это наводит на мысль о возможности использования кластера в качестве модели, подобной пузырьковым кристаллам Брэгга [5]. Эффективное развитие любого из обозначенных направлений невозможно без правильного понимания природы явления, в частности, механизма некоалесценции капель кластера.

Представленные в работе результаты получены на установке, описанной в [1], с той разницей, что кластеры индуцировались встроенным в дно кюветы нагревательным элементом, рис.1. Изменения конструкции кюветы преследовали цель улучшения условий наблюдения кластеров под микроскопом за счет минимизации амплитуды горизонтальных перемещений кластера и снижения интенсивности испарения слоя. Неожиданным следствием модернизации кюветы стало качественное изменение структуры конвективного факела – появление опоясывающего нагревательный элемент тороидального вихря, рис.1. В опытах с модернизированной кюветой были зарегистрированы новые эффекты, по-видимому, дающие ключ к раскрытию механизма некоалесценции каплей.

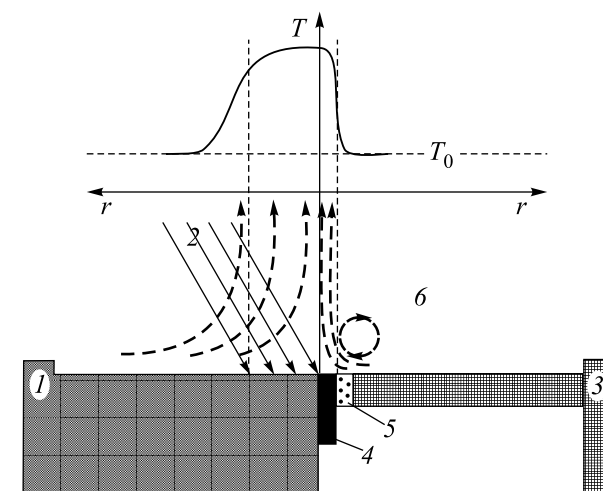


Рис.1. Сравнительные характеристики кювет. Распределение температуры (T) и структура конвективного факела (штриховые стрелки) показаны схематически. Левая половина: 1 – эбонитовая кювета, 2 – пучок белого света, создающий нагретый участок подложки 8×10 мм [1]. Правая половина: 3 – модернизированная дюралевая кювета со встроенным нагревательным элементом 4 (медный стержень диаметром 1 мм, обвитый нихромовой проволокой), 5 – теплоизолирующая тефлоновая оболочка, 6 – тороидальный вихрь

парения слоя. Неожиданным следствием модернизации кюветы стало качественное изменение структуры конвективного факела – появление опоясывающего нагревательный элемент тороидального вихря, рис.1. В опытах с модернизированной кюветой были зарегистрированы новые эффекты, по-видимому, дающие ключ к раскрытию механизма некоалесценции каплей.

Теоретически за устойчивость капель кластера к коалесценции могут быть ответственны: а) электро-

¹⁾ e-mail: fedorets_alex@utmn.ru

²⁾ Капли стабильны и вне кластера, в то же время высокоупорядоченная структура кластера – одно из проявлений сложных взаимодействий совокупности капель.

статические заряды; б) поверхностно-активные вещества; в) аэродинамические эффекты, связанные с потоками конвективного факела, и г) термокапиллярные течения в каплях [1]. Работа основывается на несложных экспериментах, позволяющих получать однозначно интерпретируемые результаты качественного характера, поэтому приводимые расчеты не выходят за рамки оценок по порядку величины.

Электростатический механизм. Предположение об электризации капель и жидкой поверхности проверялось одним из первых. Для этого кластеры индуцировались над слоем электропроводной жидкости (воды) в заземляемой металлической кювете. Оказалось, что заземление не влияло на кластер, и уже в [1] электростатический механизм некоалесценции не принимался во внимание.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ). Вопрос о роли ПАВ в механизме некоалесценции капель кластера поднимался в [1], но не получил однозначного ответа. Новые данные свидетельствуют, что ПАВ не может быть причиной некоалесценции: на видеозаписях кластеров³⁾ при горизонтальном по-

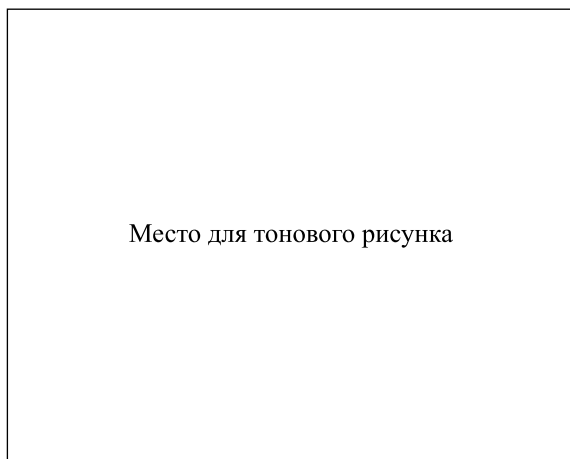


Рис.2. График зависимости расстояния от капли до жидкой поверхности от диаметра капли. Данные получены из видеозаписей кластеров при медленном (квазистационарном) повышении температуры слоя воды, вызывающем рост капель

ложению микроскопа благодаря зеркальным свойствам жидкой поверхности хорошо видно, что расстояние (H) от нижней границы капли до слоя сопоставимо с диаметром (D) капли, рис.2, то есть на несколько порядков превышает радиус действия межмолекулярных сил.

³⁾ Один из кадров показан на рис.2.

Стоксовский механизм некоалесценции.

Известно [1], что стабильность капель к коалесценции напрямую зависит от конвективного факела. Капля типичного кластера (рис.2: вода, $R = 40$ мкм, $\rho = 10^3$ кг/м³) весит

$$F_g = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g = 2.7 \cdot 10^{-9} \text{ Н.} \quad (1)$$

Такой же величины должна быть противодействующая сила Стокса⁴⁾:

$$F_S = 6\pi\mu_g R v_f, \quad (2)$$

где μ_g и v_f – динамическая вязкость и скорость обтекающей каплю влажного воздуха: $\mu_g \cong 18.5 \cdot 10^{-6}$ Па · с [6]. Подставляя в (2) значение веса капли (1), находим, что равновесие возможно при скорости $v_f = 190$ мм/с. Какова же фактическая скорость течений факела в слое локализации кластера?

Оценки можно сделать на основе нескольких взаимодополняющих источников: а) скорость паров. Измерения времени испарения известного объема жидкости показали, что в опытах скорость потока пара не могла превышать 0.25 мм/с даже при смягчающем допущении об испарении лишь с площади нагревательного элемента; б) горизонтальные перемещения отдельных капель. Их скорость достигала 0.3 мм/с; в) эксперименты по визуализации поля скоростей конвективного факела, рис.3а. Четкая корреляция данных независимых измерений v_f , рис.3б, позволяет констатировать, что фактическая скорость обтекающих кластер воздушных течений не превышает 1 мм/с. При такой скорости сила Стокса составляет десятые доли процента веса капли (1). Другим серьезным аргументом против предположения о доминирующей роли стоксовского механизма некоалесценции является ярко выраженная “привязанность” кластера к жидкой поверхности, сложно объяснимая при наличии вертикального градиента скорости течений факела. Действительно, на каплю, по какой-либо причине сместившуюся вверх, должна действовать сила Стокса, заведомо превышающая вес капли, и такая капля обязана быть унесенной конвективным факелом.

Термокапиллярный механизм некоалесценции. В [1] предложена гипотеза, согласно которой в каплях кластера развиваются интенсивные термокапиллярные течения, создающие вокруг капель индивидуальные защитные оболочки из вовлеченного в

⁴⁾ Строго говоря, вес капли следует сравнивать с вертикальной составляющей силы Стокса, но, на уровне оценок по порядку величины, можно ограничиться более простой для измерений характеристикой – абсолютной величиной скорости течений.

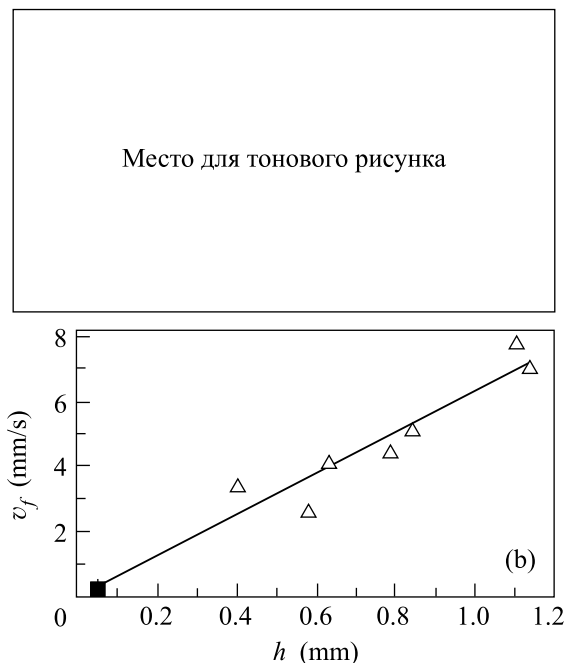


Рис.3. (а) Структура течений конвективного факела, визуализируемая лазерным пучком. Фотосъемка с выдержкой 1/20 с. (б) График, обобщающий результаты измерений скорости потоков конвективного факела

течение газа. Термокапиллярный (ТК) механизм некоалесценции хорошо известен в относительно крупных каплях нелетучих жидкостей [7, 8], но реализуем ли он в микрокаплях кластера?

Ответ могли бы дать прямые наблюдения внутрикапельных течений жидкости, однако миниатюрность капель (по размеру они сопоставимы и даже уступают частицам, традиционно используемым для визуализации течений), а также невозможность искусственного внедрения в капли визуализирующих частиц крайне осложняют такой эксперимент.

В данной ситуации особое значение приобретают опыты с модернизированной кюветой, выявившие ранее неизвестные эффекты – тандем-эффекты первого и второго типа. Тандем-эффект первого типа связан с тем, что сблизившиеся в тороидальном вихре вращающиеся капли объединяются в тандем. Попадая в кластер, тандем занимает положение, при котором ось вращения капель перпендикулярна центростремительным потокам конвективного факела, рис.4а, и, просуществовав 10–12 с, распадается на две независимые капли. Тандем-эффект второго типа наблюдается, когда выброшенная тороидальным вихрем капля “оседлывает” одну из капель кластера, рис.4б. Такие тандемы, как правило, приходят в движение, причём капля “жокей” всегда остается смещенной в сто-

рону, противоположную направлению перемещения. Период существования тандема второго типа также не превышает нескольких секунд.

В проблеме некоалесценции тандем-эффекты имеют ключевое значение, поскольку свидетельствуют о быстром вращении капель вокруг радиально-перпендикулярных горизонтальных осей, рис.4. Приняв во внимание следствия из уравнения Бернулли по положению капля “жокей” в тандеме и направлению ее вращения, задаваемому тороидальным вихрем, рис.1, можно восстановить направление вращения капель кластера, рис.5.

Причину вращения капель попытаемся объяснить с позиций ТК гипотезы. Предположим, что распределение температуры поверхности капля монотонно изменяется от максимального (T_{\max}) до минимального (T_{\min}) значения. С учетом геометрии конвективного факела следует ожидать смещения температурного минимума на некоторое расстояние ΔL относительно вертикальной оси капля, рис.5, при положении максимума на наиболее близком к слою участку капля. Несложно оценить порядок величины термокапиллярных сил (F_{TC}), порождаемых таким распределением температуры, для чего введем точку T_i , удаленную от вертикальной оси капля на ΔL в противоположном относительно T_{\min} направлении, рис.5. Температура поверхности капля в этой точке лежит в интервале $T_{\max} > T_i > T_{\min}$, и результирующая ТК сила равна:

$$F_{TC} = \sigma'_T(L - \Delta L)((T_{\max} - T_{\min}) - (T_{\max} - T_i)) = \sigma'_T(L - \Delta L)(T_i - T_{\min}), \quad (3)$$

где σ'_T – температурный коэффициент поверхностного натяжения (для воды 0.145 мН/м · К [9]), L – длина окружности радиусом R .

Если допустить, что перепад ($T_i - T_{\min}$) не превышает 0.01 К, а $\Delta L = 0.1L$, тогда для типичного кластера ($R = 40$ мкм) $F_{TC} = 3.3 \cdot 10^{-10}$ Н. Эта сила способна придать капле угловое ускорение⁵⁾:

$$\varepsilon_d = \frac{5 F_{TC}}{2 m R} = 7.6 \cdot 10^4 \text{ рад/с}^2. \quad (4)$$

Значительно сложнее рассчитать скорость установившегося вращения капель ω_d , так как для этого потребуются математическая модель явления, учитывающая процессы как в самих каплях кластера, так и в окружающей газовой среде. Впрочем, пороговое (но, по-видимому, далеко не предельное) значение скорости ω_d можно найти из следующих соображений: полупериод вращения капля (τ_d) должен не

⁵⁾ Угловое ускорение найдем, представив каплю твердым недеформируемым шариком с плотностью воды и массой m .



Рис.4. Кадры видеозаписей тандем-эффектов первого (а) и второго (б) типов при нормальном и близком к горизонтальному положениях микроскопа. Тандемы капель обведены, штриховыми прямыми показаны оси вращения капель

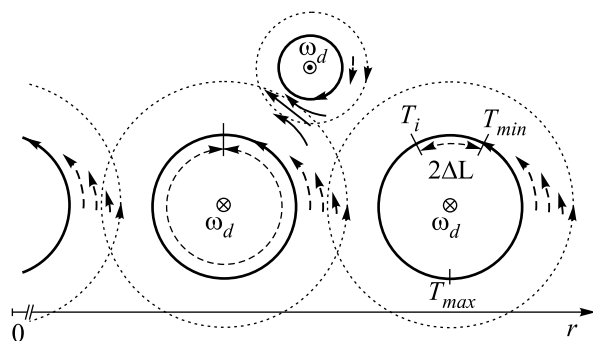


Рис.5. Кинематика капельного кластера. Точечными окружностями показаны оболочки из газа, вовлеченного в движение при вращении капель с угловой скоростью ω_d

превышать характерное время (τ_a) релаксации температурных неоднородностей за счет кондуктивного теплопереноса:

$$\tau_a \sim R^2/a. \quad (5)$$

Для рассматриваемой капли ($R = 40$ мкм, температуропроводность воды $1.615 \cdot 10^{-7}$ м²/с [10]) τ_d составляет 10 мс, что соответствует $\omega_d \sim 3.1 \cdot 10^2$ рад/с и линейной скорости поверхности капли (v_d) порядка 12.6 мм/с. Из (4) находим, что такая пороговая ско-

рость может достигаться за 4 мс, а значит, флуктуации температуры на поверхности капли, практически неизбежно, должны приводить ее во вращение.

Собственное вращение капель объясняет такие противоречивые свойства кластера как “привязанность” капель к жидкой поверхности, но устойчивость к коалесценции. Из уравнения Бернулли следует, что вращение капель создает под ними область пониженного давления, в то время как условие прилипания, выполняющееся на поверхности капель, является залогом сохранения газовой прослойки, предотвращающей коалесценцию.

Совершенствование методов регистрации и анализа изображений кластеров позволяет надеяться на повышение точности измерений до уровня, необходимого для обнаружения проявлений вращения капель в структуре кластера и, возможно, в деформациях капель. По-видимому, исследования статистически достоверных структурных особенностей кластеров могут стать одним из основных источников экспериментальных данных, подтверждающих/опровергающих ТК гипотезу некоалесценции капель кластера.

В заключение хотелось бы остановиться на одной любопытной экстраполяции в рамках ТК гипоте-

зы некоалесценции капель кластера: капли аэрозолей при определенных условиях должны быть подвержены вращению термокапиллярной природы.

Автор выражает признательность А. Н. Аксенову за техническое содействие при подготовке статьи.

1. А. А. Федорец, Письма в ЖЭТФ **79**, 457 (2004).
2. A. A. Fedorets, *International Marangoni Association Congress 2004*, Brussels, 14–17 July. Book of abstracts, 2004, p. 20.
3. А. А. Федорец, Заявка на изобретение RU № 2004123030/28(024897), 2004.
4. А. А. Федорец, Заявка на изобретение RU № 2004123031/28(024898), 2004.
5. W. L. Bragg, *J. Sci. Instrum.* **19**, 148 (1942).
6. *Физические величины*, справочник, под редакцией И. О. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
7. P. DelPaversana, J. R. Banavar, and J. Koplik, *Phys. Fluids* **8**, 15 (1996).
8. R. Monti, R. Savino, M. Lappa, and S. Tempesta, *Phys. Fluids* **10**, 2786 (1998).
9. *Поверхностные явления и поверхностно-активные вещества*, Под редакцией А. А. Абрамзона и Е. Д. Щукина. Л: Химия, 1984.
10. С. Л. Ревкин, А. А. Александров, *Теплофизические свойства воды и водяного пара*, М.: Энергия, (1980).