

03; 05.3

© 1990

ЗВЕЗДЧАТАЯ ДИССИПАТИВНАЯ СТРУКТУРА
В НЕРАВНОВЕСНОЙ КАПЛЕ

Б.А. Безуглый

К настоящему времени обнаружен и изучается ряд явлений образования диссипативных структур в открытых неравновесных системах [1]. Начало этому списку, как принято считать, положено опытами Бенара [2], хотя первые сообщения о наблюдении таких структур содержатся в работах Вебера [3], Томсона [4] и Квинке [5]. Если наблюдение полигональных [3] и мозаичных [4] структур явилось предтечей так называемой проблемы Бенара [6], то спиральную структуру Квинке последующим исследователям воспроизвести не удавалось. Здесь сообщается о новом типе пространственно-временной структуры, вызванной капиллярно-конвективной неустойчивостью в неравновесной капле [7].

Схема эксперимента показана на рис. 1. Свет от точечного источника 1 (лампа ДРШ-100) линзой 2 собирался в параллельный пучок, направляемый зеркалом 3 на кювету 7, с исследуемой жидкостью. Для дискретного ослабления пучка на его пути в касетах 5 перед кюветой и за ней помещали нейтральные светофильтры с известным коэффициентом пропускания. Диафрагма 4 позволяла плавно изменять мощность пучка. Конденсором 6 свет фокусировали на тонкий слой жидкости. Процесс образования структуры в капле наблюдали и фотографировали с помощью микроскопа 8 и фотокамеры 9. Жидкий слой состоял из прореагировавшего в УФ свете 5% раствора йода в ацетоне. Сборная кювета 7 состояла из двух круглых кварцевых пластин, разделенных тефлоновой прокладкой с отверстием, образующим рабочий объем. Кювету заполняли так, чтобы между пластинами оставался воздушный пузырек диаметром от 3 до 10 мм.

При локальном облучении тонкой пленки раствора под пузырьком растворитель испарялся и облучаемый участок обогащался малолетучей примесью, т.е. в зоне действия света возникало поле градиента концентрации примеси, которому соответствовало поле градиента поверхностного натяжения, $\nabla \sigma$. Для выбранной системы (нелетучая тензоактивная примесь в легколетучем растворителе) в условиях данного эксперимента легко обеспечивается такая ситуация, когда локальное увеличение σ , вызванное ростом концентрации, превосходит по величине его уменьшение за счет нагрева, т.к. испарение растворителя способствует быстрому теплоотводу через свободную поверхность. В результате конвективного течения, вызванного $\nabla \sigma$, в центре пучка образуется капля [7] с более высокой концентрацией примеси по сравнению с исходным раствором.

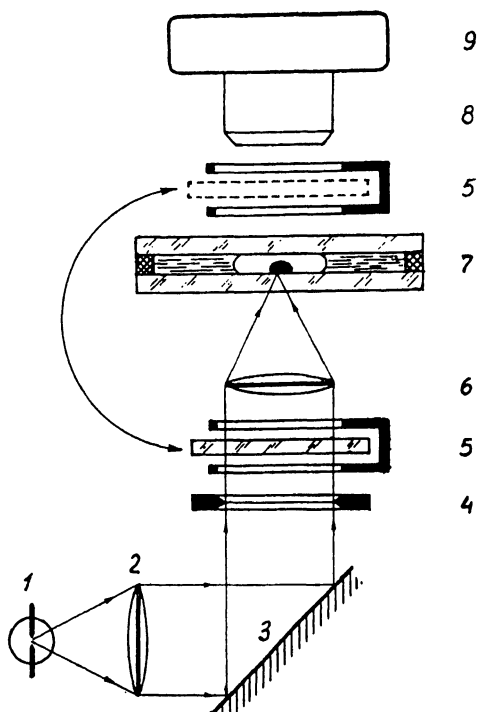


Рис. 1. Оптическая схема установки для изучения звездчатой структуры в неравновесной капле. Стрелкой отмечена операция смены местоположения светофильтра.

Рост капли можно приостановить, уменьшив диафрагмой мощность пучка. Тогда наступит квазистационарный режим: паровой отток растворителя через свободную поверхность капли равен его жидкому притоку по пленке смачивания.

После достижения капель размера, примерно равного диаметру пучка, производили формирование структуры в капле. Для этого подбирали светофильтр такой плотности, чтобы его ослабление было равно (или чуть меньше) уменьшению мощности, даваемому диафрагмой. Это равенство контролировали фотоэлементом и поддиаметру капли, чувствительному к изменению мощности [8]. Фильтр помещали в пучок перед кюветой, а диафрагму открывали настолько, чтобы капля вернулась к исходному размеру. Затем фильтр перед кюветой убирали из пучка и помещали в него за кюветой, и фотографировали каплю.

С момента удаления фильтра из пучка перед кюветой в капле происходило перераспределение поглощающей примеси таким образом, что по периметру капли возникала звездчатая структура из зон с повышенной концентрацией примеси, а центральная область

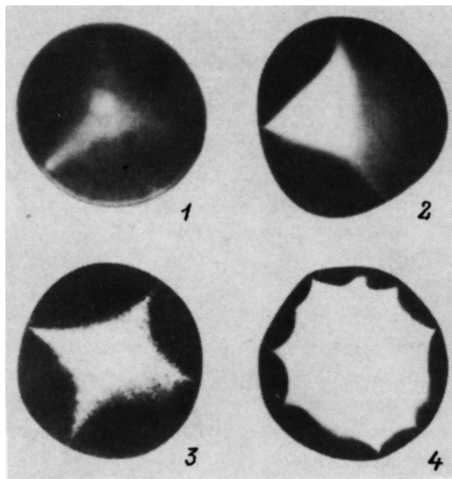


Рис. 2. Эволюция диссипативной структуры с увеличением мощности пучка $P_{вх}$: 1 – 20 мВт, 2 – 23 мВт, 3 – 25 мВт, 4 – 36 мВт. Средний диаметр капли 0,5 мм.

обеднялась (рис. 2). В итоге капля просветлялась и мощность прошедшего излучения резко возрастала.

Согласно наблюдениям, по-видимому, существует два конкурирующих сценария развития структуры: одновременная генерация двух–трех зон, делящихся и смещающихся по периметру и(или) последовательная генерация зон в какой-либо определенной периферийной области и их движение дугом по периметру с постепенным уменьшением их размера и увеличением концентрации. Через несколько секунд процесс завершался турбулизацией структуры, приводившим к выравниванию концентрации во всей капле, повышением ее поглощения и связанного с этим увеличением скорости испарения растворителя и уменьшением диаметра уже однородной капли [7, 8].

Механизм формирования зон повышенной концентрации, по мнению автора, имеет чисто капиллярно–конвективную природу и связан с появлением стоков поглощающего тензоактивного вещества на внешней межфазной границе капли, являющихся источниками по другую сторону границы, т.е. внутри капли. Отдельную зону можно рассматривать как когерентную структуру [9].

Фотометрирование негативов по плотности почернений в центре капли дает характерную зависимость мощности излучения на выходе $P_{вых}$ от мощности на входе $P_{вх}$ (рис. 3).

Резкое увеличение $P_{вых}$, имеющее место с некоторого порогового значения мощности на входе $P_{вх}^*$, позволяет усматривать аналогию с зависимостью теплового потока на выходе от градиента температуры в системе Бенара, полученной в [10]. Очевидно, что

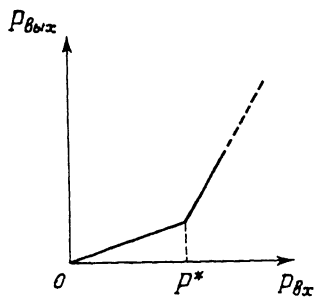


Рис. 3. Для структурирующейся капли наблюдается характерная для открытых неравновесных систем зависимость $P_{\text{вых}} = f(P_{\text{вх}})$. При $P_{\text{вх}} > (P_{\text{вх}}^* \approx 20 \text{ мВт})$ в капле происходит перераспределение концентрации поглощающего вещества таким образом, чтобы увеличить ее пропускание. Максимальная подводимая мощность $P_{\text{вх}} \approx 40 \text{ мВт}$.

так же как образование ячеек Бенара и генерацию лазера, образование представленного здесь морфологически нового типа структуры, в соответствии с развитыми в [1] представлениями о характере подобных явлений, можно считать кинетическим фазовым переходом в открытой системе.

Автор благодарит А.И. Жакина, В.И. Казачкова и И.К. Кудряцева за интерес к данной работе.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Э б е л и н г В. Образование структур при необратимых процессах. М.: Мир, 1979.
- [2] В e n a r d Н. // Rev. Gen. Sci. Pures et Appl. 1900. V. 11. P. 1261. P. 1309.
- [3] W e b e r Е.Н. // Ann. Phys. (Poggendorf). 1985. N 94. P. 447.
- [4] Т h o m s o n J.J. // Proc. Phil. Soc. Glasgow. 1882. V. 13. P. 464.
- [5] Q u i n s k e G. // Ann. Phys. (Weidemann). 1888. V. 35. P. 580.
- [6] R a y l e i g h, L o r d // Phil; Mag. Ser. 6. 1916. V. 32. P. 529.
- [7] Б е з у г л ы й Б.А. Автореф. канд. дис. М.: МГУ, 1983.
- [8] Б е з у г л ы й Б.А., Н и з о в ц е в В.В. // Вестник МГУ. Сер. Физика, астрономия. 1981. Т. 22. С. 37.
- [9] Н u s s a i n А.К.М.Ф. // Phys. Fluids, 1983. V. 26. 2816.
- [10] М о р е н о Дж. и др. // Приборы для научных исследований. 1980. Т. 51. 882.

Тюменский государственный университет

Поступило в Редакцию
29 октября 1990 г.