

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ "ТЕПЛОФИЗИКА  
И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА" АН СССР, СЕКЦИЯ ТЕПЛОМАССООБМЕНА

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО КОМПЛЕКСНОЙ ПРОБЛЕМЕ  
"РАЦИОНАЛЬНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ  
И ОХРАНА ПРИРОДЫ" ГНТ СССР, СЕКЦИЯ  
"ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ  
И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ"

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ АН СССР  
ИНСТИТУТ ТЕПЛОФИЗИКИ СО АН СССР

## КРИЗИСЫ ТЕПЛОБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ

Тезисы докладов I Всесоюзного семинара  
(19-21 июля 1989 г.)

г. Новосибирск, 1989

## О ВОЗНИКНОВЕНИИ УПОРЯДОЧЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРУКТУРЫ В МЕТАЛЛАХ РАЗОГРЕВАЕМЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ ПРИ КРИЗИСЕ КИПЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ

В. Р. Соболев (ИЭТТ АН БССР, Минск)

В настоящее время широко изучаются вопросы формирования в неравновесных системах так называемых диссипативных пространственных структур. В отличие от слабонеравновесных явлений, где термодинамические силы малы и потоки линейно зависят от сил, в существенно неравновесной или нелинейной области потоки являются, вообще говоря, более сложными функциями термодинамических сил. В линейной области, как известно, термодинамическим потенциалом, описывающим состояние системы, является само производство энтропии и в соответствии с теоремой о минимуме генерации энтропии система эволюционирует к стационарному состоянию, совместимому с наложенными на систему связями — граничными условиями. При этом изменение энтропии во времени равно нулю  $dS = 0$ , т.к.  $dS = d_e S + d_i S$  и  $d_e S$  описывает поступающий из среды поток тепла и определяет отрицательный поток энтропии, который компенсируется производством энтропии в системе  $d_i S > 0$ . Вдали от равновесия система по-прежнему может эволюционировать к некоторому стационарному состоянию, но это состояние уже не определяется с помощью некоего потенциала. При этом если состояние-аттрактор определяется минимумом потенциала его устойчивость гарантирована при любых флуктуациях, то в случае, когда термодинамические силы велики и вынуждают систему покинуть нелинейную область, устойчивость стационарного состояния и независимость его от флуктуаций не имеет места [1, 2, 3/

В некоторых случаях состояние становится неустойчивым и определенные флуктуации, вместо того чтобы затухать, усиливаются и захватывают всей системой, вынуждая ее эволюционировать к новому режиму, который качественно отличен от стационарных состояний, соответствующих минимуму производства энтропии. Говорят, что возникают упорядоченные состояния или диссипативные структуры. Название подчеркивает то обстоятельство, что система поддерживается в упорядоченном состоянии благодаря диссипации энергии. Это не противоречит второму началу, поскольку в открытой системе может осущес-

гвляться упорядоченной состояние. При этом неизбежный неизбежный прирост внутренней энтропии за счет необратимых процессов с диссипацией энергии компенсируется потоком отрицательной энтропии извне.

Примеров таких неустойчивостей достаточно много, особенно среди гидродинамических систем. Это и переход от ламинарного течения жидкости к турбулентному при превышении порога скорости течения жидкости, и неустойчивости — так называемые ячейки Бенара, которые возникают в слое жидкости, помещенном между горячей нижней пластинкой и холодной верхней, когда градиент температуры превышает критическое значение, и явление так называемых цилиндров Тейлора.

Возникновение упорядоченной структуры, по-видимому, можно наблюдать и в процессах передачи тепла. Действительно если с точки зрения феноменологического подхода для реализации подобного явления необходимы столь сильные условия отклонения от равновесия, что режим системы становится нелинейным, вполне возможно попытаться реализовать его за счет специфических внешних, т.е. граничных условий, связывающих в данном случае систему с окружающей средой.

В явлениях переноса в металлах, где кинетические коэффициенты монотонно зависят от температуры  $T$ , а законы передачи тепла и заряда в значительной мере линейны, генерация критической неустойчивости при разогреве металлической среды электрическим током, видимо, возможна за счет нелинейности от  $T$  теплоотода. Так если в качестве среды выбрать криогенную жидкость и использовать тепловые напоры, которые приведут к потокам через поверхность образца на уровне кризисного, система может войти в нелинейный режим. Действительно, в общем случае уравнение для распределения  $T$  по длинному цилиндрическому образцу, разогреваемому электрическим током и помещенному в жидкость, имеет вид [17]

$$\frac{d}{dx} (\lambda \frac{dT}{dx}) + \rho (T) j^2 - \frac{p}{a} q(T - T_0) = 0 \quad (1)$$

где  $\lambda$ ,  $\rho$  — теплопроводность и удельное электросопротивление,  $j$  — плотность тока, а  $q(T - T_0)$  определяет тепловой поток через боковую поверхность;  $p$  и  $a$  — периметр и поперечное сечение образца,  $T_0$  — температура насыщения жидкости.

Исходя из анализа кривой кипения, плотность теплового потока имеет  $N$ -образную форму, и в переходной области функцию  $q(T - T_0)$  можно представить в виде ряда

$$q(T - T_0) = q(T_0 - T_0) + q'_0(T_0 - T_0)[T - (T_0 - T_0)] + \frac{1}{2} q''_0(T_0 - T_0)[T - (T_0 - T_0)]^2 + \dots$$

где  $T_0$  — некоторая точка на температурной зависимости кривой кипения в переходной области.

Подставляя выражение для  $q(T - T_g)$  в (I) и преобразуя его

$$\frac{\Delta \sigma}{\sigma} \frac{d^2}{dx^2} (T - T_g) + \frac{d\Delta}{dx} \left[ \frac{d(T - T_g)}{dx} \right]^2 + \rho(T) q^2 - \frac{q}{\rho} \left[ q(T - T_g) + q' (T - T_g) (T - T_g) + q'' (T - T_g) (T - T_g)^2 \right] = 0$$

Поскольку в переходной области вблизи первого кризиса  $q' \neq 0$ ,

$q'' < 0$ , то в условиях когда

$$\left| q' (T - T_g) (T - T_g) + q'' (T - T_g) (T - T_g)^2 \right| > \left| q (T - T_g) - \frac{q}{\rho} \rho^2 - \frac{d\Delta}{dx} \left[ \frac{d(T - T_g)}{dx} \right]^2 \right|$$

характеристическое уравнение будет иметь мнимые корни, что говорит о периодичности распределения температуры по длине образца.

В эксперименте использовался образец, изготовленный из молибденовой проволоки диаметром 0.5 мм, который имел длину 25 см. Образец был помещен в ванну с жидким азотом. Источником питания служил генератор тока. Образец находился в горизонтальном положении. При увеличении тока через образец до 15 ампер наблюдался периодический вдоль длины его разогрев, выражающийся в появлении светящихся участков длиной 10 мм. При этом в соответствии с величиной тока число их, а также положение, изменялись. При токе через образец 15 ампер общее падение напряжения на образце, на котором имелось шесть светящихся участков, составляло 6 вольт. В то же время при токе, вдвое меньшем, 7,5 ампер, когда светящиеся участки отсутствовали, падение напряжения составляло 1.3 Вольта.

Полученная температурная пространственная структура таким образом реализуется в режиме заданного тока. Она принципиально отличается от так называемых температурно-электрических доменов, реализуемых в режиме заданного напряжения, составляющих физическую основу работы барреттеров.

## Л и т е р а т у р а

1. Эбелинг В. Образование структуры при необратимых процессах. М.: Мир, 1979, 279 с.
2. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986 431 с.
3. Карери Д. Порядок и беспорядок в структуре материи. М.: Мир, 1985, 228 с.
4. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964, 487 с.