

## О САМООРГАНИЗАЦИИ ТЕПЛОВОГО ЦИКЛА ПРИ СВЕТОФОРЕЗЕ

А.Т. Суходольский

*Предложено рассматривать макроскопическое движение при светофорезе как результат обратимого теплового цикла, в котором поверхность жидкости служит рабочим телом. Получен неравновесный аналог  $p$ - $v$ -диаграммы, соответствующий такому круговому циклу.*

Для процесса преобразования тепла  $Q$  работу  $A$  необходимо построение устройств, работающих по принципу тепловой машины, в которых рабочее тело в рамках искусственно создаваемых ограничений периодически участвует в термодинамическом цикле. Классическим рабочим телом в термодинамике является газ (пар), выполняющий  $p$ - $v$ -работу по перемещению поршня, для которого в приближении медленного "квазиравновесного" перемещения реализуется обратимость термодинамического цикла.

Представляет интерес исследовать системы, в которых в рамках естественных природных ограничений происходит преобразование  $Q \rightarrow A$  "само по себе", т.е. происходит самоорганизация теплового цикла. Это тесно связано с проблемами самоорганизации при исследовании причин возникновения кооперативного макроскопического движения в начально хаотической однородной системе /1/. В /2/ приведен пример диссипативной структуры ("кавитатора"), где происходит самоорганизация теплового цикла при непрерывном лазерном нагреве жидкости.

В настоящем сообщении анализируется наблюдавшийся ранее эффект лазерного светофореза /3/ с точки зрения возникновения макроскопического движения как результата периодического процесса, в котором рабочим телом является поверхность жидкости, участвующая в обратимом тепловом цикле. Цель такого рассмотрения состоит в определении оптимальных условий для получения максимального КПД преобразования  $Q \rightarrow A$ , что имеет значение при практических применениях светофореза.

Рассмотрим сферическую каплю радиуса  $R$ , которая освещается однородным излучением, направленным вдоль оси  $z$ . Коэффициент поглощения капли  $a \gg 1/R$ . При нагреве возникает градиент поверхностного натяжения между освещенной и неосвещенной частями капли, приводящий к движению ее как целого. Для получения аналитического выражения для скорости светофореза  $u$  ограничимся первым членом разложения зависимости  $\sigma(\Theta) = \sigma_0 + \Delta \cos \Theta / 3$ , в которой в общем случае  $\sigma$  зависит от  $u$ . Тогда скорость светофореза определяется выражением

$$u = 2\Delta/3(3\eta_1 + 2\eta_2), \quad (1)$$

где  $\eta_1$  и  $\eta_2$  — динамическая вязкость жидкости в капле и вне ее.

Заметим, что работа, выполняемая силами поверхностного натяжения, носит неравновесный, неизо-термический характер, поэтому первым возникающим здесь вопросом является получение неравновесного аналога "квазиравновесной"  $p$ - $v$ -работы. С этой целью введем понятие потока межфазной поверхности, под которой согласно Гиббсу /4/ понимается не просто геометрическая, бесконечно тонкая поверхность, а поверхность, характеризующая избыточную третью фазу на границе двух объемных фаз. В силу того, что толщина избыточной фазы много меньше ее длины, предполагаем, что поток поверхности происходит без изменения "локальных" равновесных гиббсовых избытков.

Рассмотрим некоторый элемент границы раздела фаз площадью  $\Delta s$ . Поток поверхности через элемент отрезка  $dl$ , ограничивающий  $\Delta s$ , равен  $\rho_s v_s dl$ , где  $dl$  по абсолютной величине равен длине отрезка и направлен по внешней нормали к нему, а  $\rho_s$  — поверхностная плотность, которую упрощенно можно представить как среднее число взаимно адсорбированных молекул, приходящееся на единицу площади границы раздела. Полный поверхностный поток через границы  $\Delta s$  равен  $\int \rho_s v_s d\Omega$ . Поток избыточной поверхности через

границы  $\Delta s$  определяется источниками и стоками поверхности, связанными с выходом молекул из объема на поверхность и наоборот, поэтому он равен  $\int_{\Delta s} \xi ds$ , где  $\xi$  — плотность источников или стоков. Сравнивая последние два выражения, получим уравнение непрерывности для потока межфазной поверхности

$$\rho_s \operatorname{div}_s v_s + v_s \operatorname{grad} \rho_s - \xi = 0,$$

которое для случая несжимаемой поверхности  $\rho_s = \text{const}$  имеет вид

$$\xi = \rho_s \operatorname{div}_s v_s. \quad (2)$$

Для нахождения неравновесного мощностного аналога квазиравновесной  $pv$ -работы заметим, что так как мерой поверхностного натяжения является обратимая работа изотермического образования единицы поверхности, то в области границы раздела фаз, соответствующей стоку ( $\xi < 0$ ), выполняется положительная работа  $(\sigma_c \xi_c / \rho_s) ds$ , часть которой  $(\sigma_u \xi_u / \rho_s) ds$  идет на создание источников, а оставшаяся часть — на выполнение полезной работы. Следовательно, здесь есть все признаки обратимого термодинамического цикла, для которого полезная мощность  $N$  может быть найдена путем интегрирования по всем источникам и стокам:

$$N = \int_s \sigma \xi \rho_s^{-1} ds. \quad (3)$$

Для случая светодиффузии жидкой капли, скорость которой описывается (1), нетрудно получить аналог классической  $pv$ -диаграммы, соответствующей интегралу (3). Если воспользоваться полем скоростей, полученным ранее [3], то из (2) можно найти распределение плотности источников и стоков

$$\xi(\Theta) = 3(u/R) \cos \Theta. \quad (4)$$

Неравновесным аналогом  $pv$ -диаграммы в случае светодиффузии может служить зависимость поверхностного натяжения  $\sigma(\Theta)$  от "приведенной" площади  $S_\xi(\Theta)$ , дифференциал которой равен  $(\xi(\Theta)/\rho_s) ds$ . На рис. 1 изображена зависимость величины поверхностного натяжения от "приведенной" площади  $S_\xi(\Theta) = 3\pi R u \sin^2 \Theta$ , полученная из (4) с учетом (2) и (3), из которой следует, что полезная мощность определяется заштрихованной частью диаграммы. Заметим, что здесь движение по кривой соответствует не временной последовательности термодинамического цикла, совершаемого рабочим телом, а пространственному распределению областей поверхности, выполняющих положительную и отрицательную работу. Суммарная "приведенная" площадь при изменении угла  $\Theta$  от 0 до  $\pi$  равна нулю, что выполняется при условии постоянной пло-

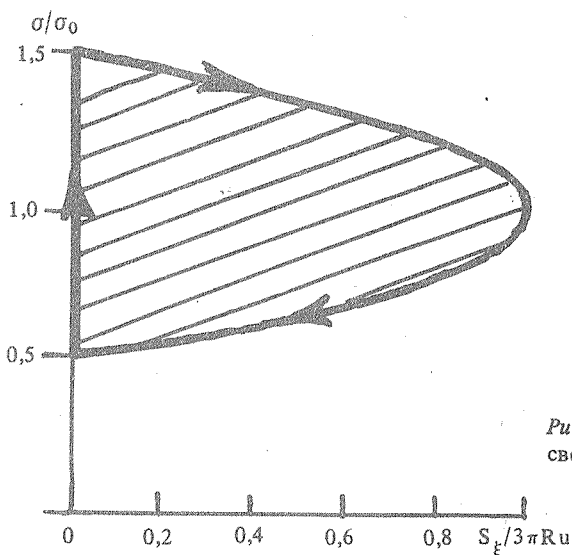


Рис. 1.  $\sigma \xi$ -диаграмма обратимого термодинамического цикла при светодиффузии, рассчитанная при  $\Delta = 0,5\sigma_0$ .

щади поверхности капли. Проведенный анализ позволяет сделать вывод о том, что полезная мощность преобразования  $Q \rightarrow A$  при светофорезе определяется в основном разностью между максимальным и минимальным значениями стационарного  $\sigma$  и скоростью  $u$ , а КПД зависит от мощности накачки  $W$  как  $\sqrt{W}$ , так как  $\Delta \sim W/u$  и  $u \sim \Delta$ .

В заключение сформулируем основные выводы данной работы:

1. Высокая по сравнению с диффузионными механизмами эффективность массопереноса, наблюдаемая при светофорезе [3], обусловлена самоорганизацией теплового цикла, совершаемого поверхностью раздела фаз, служащей рабочим телом.

2. Полезная работа при светофорезе выполняется за счет того, что свободная энергия, выделяемая при исчезновении поверхности в холодной части капли (холодильнике), больше энергетических затрат на образование новой поверхности в нагретой части капли (нагревателе).

3. Предложенный в данной работе термодинамический подход может быть полезен при анализе других термокапиллярных явлений.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Хакен Г. Синергетика. М., Мир, 1980.
2. Растопов С. Ф., Суходольский А. Т. ДАН, 295, № 5, 1104 (1987).
3. Суходольский А. Т. Известия АН СССР, сер. физ., 50, № 6, 1095 (1986).
4. Гиббс Дж. В. Термодинамика. Статистическая механика. М., Наука, 1982.

Поступила в редакцию 16 февраля 1988 г.