

генераторах их роль могут играть обратная связь и накачка; в гидродинамике — это значения чисел Рейнольдса, Рэлея и Тэйлора; в мультистабильных системах характер эволюции зависит от выбора нач. условий; в системах с иерархией характерных времён управляющим параметром может служить «медленное» время.

Применение У. о. к. Предлагаемый У. о. к. был установлен первоначально на двух примерах неравновесных процессов: 1) развитие генерации в автоколебательных системах по мере увеличения коэффициента положит. обратной связи; 2) переход от ламинарного течения к стационарному турбулентному течению в каналах по мере роста числа Рейнольдса. Если увеличение степени упорядоченности по мере развития генерации представляется очевидным, то второй пример является более сложным.

Традиционно турбулентное движение считается более хаотическим, чем ламинарное. Однако сравнение отношения степени упорядоченности стационарного турбулентного и ламинарного течений на основе У. о. к. S-теоремы показывает, что турбулентное движение является в определ. смысле более упорядоченным, а переход от ламинарного течения к турбулентному служит примером неравновесного фазового перехода. Роль параметра порядка играет при этом тензор напряжений Рейнольдса, к-рые определяются коллективными движениями, возникающими из хаотического молекулярного движения. По У. о. к. S-теоремы разность энтропий ламинарного и стационарного турбулентного течений определяется выражением

$$T(S_{\text{лам}} - S_{\text{турб}}) = \frac{1}{2} \rho \langle (\delta u)^2 \rangle > 0, \quad (5)$$

т. е. энтропия ламинарного течения больше энтропии осреднённого турбулентного течения. Изменение энтропии определяется дисперсией гидродинамич. скорости δu — суммой диагональных элементов тензора напряжений Рейнольдса. Этот результат, согласно S-теореме, показывает, что переход от ламинарного течения к турбулентному представляет собой пример процесса самоорганизации.

Большая организованность турбулентного течения проявляется, в частности, в следующем. В ламинарном потоке перенос импульса от слоя к слою, приводящий к появлению вязкости, осуществляется независимыми изменениями импульса отд. атомов. В противоположность этому, при турбулентном течении перенос импульса и связанное с ним сопротивление есть коллективный процесс.

Важной характеристикой степени упорядоченности является $\sigma \equiv \dot{S}$ — производство энтропии. Сопоставление значений производства энтропии двух видов движения: стационарного (осреднённого) турбулентного течения и неустойчивого при числах Рейнольдса, больших критич. значения ($Re > Re_{кр}$) ламинарного течения, показывает, что при доп. условии постоянства напряжения на стенках канала производство энтропии при турбулентном (устойчивом при $Re > Re_{кр}$) течения меньше производства энтропии при ламинарном (неустойчивом при $Re > Re_{кр}$) течении, т. е.

$$\sigma_{\text{лам}} - \sigma_{\text{турб}} > 0. \quad (6)$$

Т. о., новому устойчивому состоянию, к-рое устанавливается в результате рассматриваемого неравновесного фазового перехода, отвечает меньшее производство энтропии.

Обобщение У. о. к. В неравновесной термодинамике имеет место принцип минимума производства энтропии в стационарном состоянии (*Пригожина теорема*), согласно к-рому $\sigma(t) > \sigma_{\text{стат}}$, где $\sigma_{\text{стат}}$ — производство энтропии в стационарном состоянии, а $\sigma(t)$ — производство энтропии в неустойчивом (текущем) состоянии. Этот результат доказан для линейных термодинамич. систем; общее доказательство для нелинейных систем отсутствует. На основе неравенства (6) предлагается сформулировать общий принцип минимума производства энтропии в процессах самоорганизации следующим образом.

Рассмотрим нек-рый процесс самоорганизации, формируемый последовательностью стационарных состояний, отвечающих разл. значениям управляющего параметра a . Пусть $a_{кр}$ — критич. значение, при к-ром происходит

очередная бифуркация или, иными словами, *неравновесный фазовый переход*. Обозначим через $\sigma_{\text{стат}}$ значение производства энтропии в новом устойчивом состоянии, к-рое возникло в результате этого перехода [этой величине отвечает $\sigma_{\text{турб}}$ в ф-ле (6)]. Прежнее — добифуркационное состояние становится при $a > a_{кр}$ неустойчивым и не реализуется. Если, однако, обозначить производство энтропии в этом состоянии через $\sigma_{\text{нестат}}$ [эта величина соответствует $\sigma_{\text{лам}}$ в ф-ле (6)], то предлагаемый принцип выражается неравенством

$$\sigma_{\text{стат}} > \sigma_{\text{нестат}}, \quad (7)$$

к-рое показывает, что при неравновесных фазовых переходах в ходе процесса самоорганизации система идёт по пути уменьшения производства энтропии. Разумеется, как и при переходе от ламинарного течения к турбулентному, расчёт значений $\sigma_{\text{стат}}$ и $\sigma_{\text{нестат}}$ следует проводить при доп. условиях, конкретный вид к-рых зависит от структуры рассматриваемой системы.

Вопрос об общем доказательстве принципа (7) остаётся открытым. Однако если даже окажется, что применимость его ограничена, то всё же сделанное на основе частного результата (6) общее утверждение (7) может стать стимулирующим.

Лит.: Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М., Гидродинамика, 4 изд., М., 1988; Монян А. С., Яглом А. М., Статистическая гидромеханика, 2 изд., СПб., 1992; Климонтович Ю. Л., Энтропия и производство энтропии при ламинарном и турбулентном течениях, «Письма в ЖТФ», 1984, т. 10, в. 2, с. 80; Ebeling W., Klimontovich Y. L., Selforganization and turbulence in liquids, Lpz., 1984; Климонтович Ю. Л., Энгель-Херберт Х., Осредненные стационарные турбулентные течения Куэтта и Пуазейля в несжимаемой жидкости, «ЖТФ», 1984, т. 54, с. 440; Пригожин И., Стенгерс И., Порядок из хаоса, пер. с англ., М., 1986; Климонтович Ю. Л., Проблемы статистической теории открытых систем: критерии относительной степени упорядоченности состояний в процессах самоорганизации, «УФН», 1989, т. 158, с. 59; его же, Турбулентное движение и структура хаоса, М., 1990, Dordrecht, 1991; Lesieur M., Turbulence in fluids, 2 ed., [Dordrecht], 1990; Хакен Г., Информация и самоорганизация, пер. с англ., 1991; Зубарев Д. Н., Морозов В. Г., Трошкин О. В., Турбулентность как неравновесный фазовый переход, «ТМФ», 1992, т. 92, № 2, с. 293; Klimontovich Y. L., Statistical theory of open systems, Dordrecht, 1995.

Ю. Л. Климонтович.

УПРАВЛЯЕМЫЙ ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ (УТС) — процесс слияния лёгких атомных ядер, проходящий с выделением энергии при высоких темп-рах в регулируемых управляемых условиях. УТС пока ещё не реализован. Для осуществления реакций синтеза реагирующие ядра должны быть сближены на расстояние порядка 10^{-11} см, после чего процесс их слияния происходит с заметной вероятностью за счёт *туннельного эффекта*. Для преодоления потенц. барьера сталкивающимся лёгким ядрам должна быть сообщена энергия ~ 10 кэВ, что соответствует темп-ре $\sim 10^8$ К. С увеличением заряда ядер (порядкового номера Z) их кулоновское отталкивание усиливается и величина необходимой для реакции энергии возрастает. Эфф. сечения (p, p -реакций, обусловленных *слабыми взаимодействиями*, очень малы. Реакции между тяжёлыми изотопами водорода (дейтерием и тритием) обусловлены *сильным взаимодействием* и имеют сечение на 22—23 порядка выше (см. *Термоядерные реакции*). Различия в величинах энерговыделения в реакциях синтеза не превышают одного порядка. При слиянии ядер дейтерия и трития оно составляет 17,6 МэВ. Большая скорость этих реакций и относительно высокое энерговыделение делают равнокомпонентную смесь дейтерия и трития наиб. перспективной для решения проблемы УТС. Тритий радиоактивен (*период полураспада* 12,5 лет), не встречается в природе. Следовательно, для обеспечения работы *термоядерного реактора*, использующего в качестве ядерного горючего тритий, должна быть предусмотрена возможность его воспроизводства. С этой целью рабочая зона реактора может быть окружена слоем лёгкого изотопа лития, в к-ром будет идти реакция

