

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

## БАЗИС-ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ТЕНЗОРЫ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

*В работе введены шесть базис-определяющих тензоров термогазодинамики. Показано, что каждому тензору соответствует физическая характеристика термодинамики, газовой динамики или термохимии.*

*Определяющей характеристикой в процессах, связанных с молекулярным переносом, является энтропия и зависящая от неё связанная энергия, входящая в базис-определяющие тензоры.*

*In the work introduced six basis-defining tensors thermogasdynamics. It is shown that each tensor corresponds to the physical characteristics of the thermodynamics, gas dynamics, or thermochemistry.*

*The defining characteristic of the processes associated with molecular transport, is entropy and depend on the associated energy, which is the basis for defining tensor.*

**Ключевые слова:** турбулентность, термогазодинамика, тензор.

**Keywords:** turbulence, thermogasdynamics, tensor.

Описывая математически тот или иной процесс, мы с разной степенью общности при помощи символов отображаем его нюансы, научную емкость, наполненность содержанием. Для практики в первую очередь нужны цифры и тогда математический аппарат ложится в основу конструкции, эксперимента, испытания. Но если мы с помощью математики пытаемся познать мир, окружающие нас физические процессы, то математика тем ценнее, чем она сложнее. Но сложность не в смысле загруженности информацией нужной и ненужной, а в смысле качественного, желательного однозначного и правильного плотноупакованного научного символического объекта. В связи с этим можно еще раз констатировать, что, по-видимому, самое полное описание процесса может быть осуществлено с помощью тензорных уравнений. Это - верх научной символики на сегодняшний день. Это - наиболее полная и содержательная упаковка смысловых отображений реальности. Это - самая простая и логичная взаимосвязь частных внутри общего. В термогазодинамике используется определенный набор параметров, описывающих процесс. Это те ключи, которые связывают науку с практикой. Эти параметры можно пощупать, оценить, сравнить. Но более сложные характеристики - импульсы, энергии, уже являются продуктами абстрагирования. Термодинамические потенциалы являются уже продуктами обобщения. И всегда, рассматривая тот или иной процесс, мы наталкиваемся на то, что этих характеристик для описания в общем-то требуется ограниченное количество. Из этого количества далее следуют производные, необходимые часто для более подробного понимания.

Итак, известно, что к основным термодинамическим потенциалам относятся четыре энергии: это - внутренняя энергия  $U$ , энтальпия  $h$ , свободная энергия (потенциал Гельмгольца)  $F$  и свободная энтальпия (термодинамический потенциал Гиббса)  $G$ . Построение двух последних потенциалов тесно связано с понятиями связанная энергия ( $ST$ ) и большим потенциалом ( $RT$ ) [1]. Причем  $RT$  - это частный случай ( $ST$ ), реализующийся при условии термодинамического равновесия [2]. И тогда с учетом двух последующих потенциалов можно записать:

$$U, h, F = U - ST; G = h - ST = U + RT - ST.$$

С помощью потенциалов описываются термодинамические, химические и другие различные равновесные и неравновесные процессы.

### Взаимосвязь потенциалов

Все перечисленные потенциалы связаны между собой. Так, например, известно, что внутренняя энергия для газа может быть записана как произведение теплоемкости при постоянном объеме:

$$U = C_v \cdot T.$$

Энтальпия - как произведение теплоемкости при постоянном

давлении:

$$h = C_p \cdot T.$$

Тогда потенциал Гельмгольца запишется в виде

$$F = C_v T - ST,$$

а Гиббса:

$$G = C_p T - ST = C_v T + RT - ST.$$

Итак, четыре величины одной размерности определяют четыре базисных потенциала. Это:  $C_v, C_p, S$  и  $R$ .

Ранее, при интерпретации второго закона термодинамики, было показано [2], что энтропия всегда больше или равна газовой постоянной:

$$S \geq R.$$

Из соотношения Майера известно, что теплоемкость при постоянном давлении всегда больше на величину газовой постоянной  $R$ , чем теплоемкость при постоянном объеме:

$$C_p - C_v = R.$$

Далее из определения потенциала Гельмгольца, в предположении, что он всегда положителен, следует

$$F = C_v T - ST = (C_v - S)T \geq 0.$$

То есть получается, что теплоемкость при постоянном объеме всегда больше энтропии:

$$C_v \geq S.$$

Тогда выстраивается приоритетная цепочка в виде тройного неравенства:

$$C_p \geq C_v \geq S \geq R.$$

Самая большая величина всегда  $C_p$  и самая маленькая -  $R$ . А как же тогда правая граница величины  $S$ ? Получается, что она ограничена сверху как минимум теплоемкостью при постоянном объеме. А может ли она быть бесконечно большой? Да, может. Все зависит от величины

$$K = C_p / C_v.$$

Запишем неравенство в виде:

$$1 \leq S/R \leq 1/(k-1).$$

Это неравенство показывает, что энтропия с одной стороны ограничена величиной  $R$ , а с другой комбинацией из  $C_p/C_v$ , или для идеального газа комбинацией из показателя адиабаты. Видно, что при  $k \rightarrow 1$ , энтропия будет стремиться к бесконечности.

### Базис-определяющие тензоры

В работе [3] был введен в обиход молекулярно-кинетический тензор  $K$ . Он был сконструирован как потенциал, умноженный на единичный тензор  $1$ . Этим потенциалом была внутренняя энергия. Дивергенция от этого потенциала приобрела смысл производной от импульса потока и интерпретировалась как четвертый закон термодинамики [4]. С целью наглядности напишем этот закон для случая  $\rho = \text{const}$ :

$$\frac{dj}{d\tau} = - \text{div} K.$$

Другими словами, поток модифицированного тензора Князева есть результирующая сил, действующая на элемент жидкости.

По аналогии с предложенным приемом построим на базе перечисленных выше потенциалов новые тензоры. Эти тензоры будут базис-определяющими в термогазодинамике. Другие тензоры, построенные на их основе, будут только вариациями. Итак, всего было зафиксировано шесть базис-определяющих потенциалов. Это - внутренняя энергия  $U$ ; энтальпия  $h$ ; связанная энергия  $ST$ ; большой потенциал  $RT$ ; потенциал Гельмгольца  $F$  и потенциал Гиббса  $G$ .

Далее построим шесть новых тензоров.

$K = U \cdot I$  - модифицированный тензор Князева.

$L = h \cdot I$  - тензор, связанный с энтальпией или теплосодержанием. Этот тензор назовем именем основателя учения о теплоте, великого русского ученого Михайло Васильевича Ломоносова. Тензор Ломоносова.

$M = (RT) \cdot I$  - тензор, построенный на базе большого потенциала. Этот тензор вправе может быть назван в честь великого русского ученого Дмитрия Ивановича Менделеева, открывшего универсальную газовую постоянную. Тензор Менделеева.

$Q = (ST) \cdot I$  - тензор в честь Рудольфа Юлиуса Эммануила Клаузиуса, который впервые ввел понятие энтропии в термодинамику.

$G = F \cdot I$  - тензор Гельмгольца, в честь великого немецкого ученого Германа Людвиг Фердинанда фон Гельмгольца первооткрывателя начал термодинамики.

$D = G \cdot I$  - тензор Гиббса. Джозайя Виллард Гиббс - великий ученый, основоположник неравновесной химической термодинамики и молекулярной физики.

Частным, но очень важным тензором может быть тензор Людвиг Больцмана, величайшего австрийского ученого-теоретика и основоположника статистической физики:  $B = (KT) \cdot I$ .

Этот тензор связан с тензором Менделеева и отличается лишь от него, как известно, только числом Авогадро.

### Краткая интерпретация базис-определяющих тензоров

Модифицированный тензор Князева был уже определен и имеет четкий физический смысл. Дивергенция от этого тензора тесно связана с основным газодинамическим параметром - импульсом потока, точнее с его субстанциональной производной.

Рассмотрим тензор Ломоносова. Этот тензор можно преобразовать и представить в виде градиента:

$$\text{div} L = \text{grad } h.$$

В принципе дивергенция от тензора Ломоносова есть градиент от энтальпии потока. В работе [5] была получена связь этого градиента с тензором собственных частот, присущий упругой газовой или жидкостной среде  $T$ :

$$\vec{V} \cdot T = -\text{grad } h = -\text{div } L.$$

Действительно, одним из трех условий устойчивости автоколебаний является условие подпитывания энергией колебательно-го контура. В данном случае это выражается в виде энтальпии, поступающей в контур, например, в результате горения топлива.

Известно, что тепловой поток в соответствии с законом Фурье пропорционален градиенту температуры

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T.$$

Новое представление этого закона может быть изображено с помощью тензора Менделеева

$$\vec{q} = -\frac{\lambda}{R} \text{div } M$$

или тензора Больцмана

$$\vec{q} = -\frac{\lambda}{k} \text{div } B.$$

Таким образом и тензор Менделеева, и тензор Больцмана связаны с тепловыми потоками.

Закон Фика о потоках концентраций также может быть интерпретирован как зависимость от фундаментального тензора Гиббса. Без вывода, но со ссылкой на [6] можно записать этот закон через химический потенциал  $\mu$ :

$$X_i = -\text{grad } \mu_i.$$



Николай Иноземцев - русский ученый



Ларс Онзагер - норвежский ученый



Илья Пригожин - бельгийский ученый

Или в общем виде, вспоминая, что  $\mu$  есть удельный потенциал Гиббса, через тензор:

$$\Pi = -\text{div } D.$$

Аналогично можно найти интерпретацию и для тензора Гельмгольца.

Анализируя последние выражения, можно сказать, что применение преобразования дивергенция к любому из шести базис-определяющих тензоров обязательно приведет к пониманию того, что внутри термодинамической системы существуют внутренние силы и микропотоки в виде диффузии, тепла и т.д.

По аксиоматизированной теории Онзагера, развитой впоследствии Пригожиным, пропорциональность между силами и скоростями при стационарном движении распространяется на любые процессы. Причины появления сил должны определяться градиентами концентраций, температур, давлений и т.д.

В общем случае потоки зависят сразу от всех сил, действующих в системе. Так, например, диффузия определяется как градиентом концентрации, так и градиентом температуры. Теория Онзагера в общем не противоречит эксперименту, хотя она и не была выведена из точных теорий, а если так, то можно сказать, что она была сконструирована. В любом случае эта теория отвечает на главный вопрос: процессы переноса внутри системы связаны с возникновением градиентов параметров молекулярной системы вещества, а значит с возрастанием энтропии. Любой процесс внутри системы, связанный с переносом, будет сопровождаться производством энтропии. Из теории Онзагера также однозначно следует:

$$\rho \frac{dS}{d\tau} = \frac{1}{T} \sum J_i X_i,$$

где  $J_i$  и  $X_i$  - условные обозначения потоков и сил.

А в каком же виде сама энтропия выступает в этой ситуации? Ведь ее также можно выразить и в виде градиента?

$$\rho \frac{dS}{d\tau} = \vec{V} \cdot \text{grad } S.$$

И, конечно же, в виде тензора Клаузиуса:

$$\frac{dST}{d\tau} = \vec{V} \cdot \text{div } Q,$$

зависящего от так называемой связанной энергии ( $ST$ ).

Получается, что для необратимых процессов, таких как законы Фурье, Фика и т.д., этот тензор является самым главным. Ведь производство ( $ST$ ) осуществляется в результате появления внутренних потоков, градиентов, зависящих от градиента связанной энергии. Любой градиент, например, концентрации или температуры определяется градиентом энтропии, а также связанной энергии.  $\square$

### Литература

1. Н.В. Иноземцев. Основы термодинамики и кинетики химических реакций // М. Изд. Военной академии МиМКА им. Сталина, 1940.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Новая интерпретация второго закона термодинамики и теорема векторного анализа о соотношении движений // Двигатель №6, 2016.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Молекулярно-кинетический тензор // Двигатель №1, 2016.
4. Н.Ю. Кочетков. Турбулентность. Четвертое начало термодинамики или первое начало термогазодинамики // Двигатель №5, 2016.
5. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Фундаментальный тензор собственных частот // Двигатель №2, 2016.
6. А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман. Физическая химия // М. изд. По черной и цветной металлургии, 1963.

Связь с автором: swgeorgiy@gmail.com