

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ.

## ЧЕТВЕРТОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ ИЛИ ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ

Юрий Михайлович Кочетков, д.т.н.

*Сформулировано четвертое начало термодинамики. Полученное новое уравнение импульсов по сравнению с уравнением Навье–Стокса содержит дополнительный член, отражающий релаксационный процесс и описывается законом действующих масс.*

*The fourth law of thermodynamics is formulated. A new momentum equation compared to the Navier-Stokes equation contains the additional term which reflects the relaxation process and described by the law of mass action*

**Ключевые слова:** турбулентность, термодинамика, импульс, энергия, движение.

**Keywords:** turbulence, thermodynamics, momentum, energy, movement.

Основополагающими законами физической науки являются начала термодинамики, на которых базируется сама наука. В настоящее время их три. Это первое начало термодинамики - закон сохранения и превращения энергии, второе - закон положительного производства энтропии и третье - так называемая тепловая теорема Нернста. Эти начала или законы устанавливают собой связь между фундаментальными понятиями: тепло, энергия, работа и определяют правила протекания процессов внутри термодинамической системы. Начала являются фундаментом таких наук как гидрогазодинамика, теплообмен, акустика, реология, магнитоплазодинамика и др. В любой ситуации при конкретных расчетах для любой прикладной теории требуются начальные условия из термодинамики. Помимо снабжения этих наук исходными данными термодинамика сама по себе является мировоззренческой наукой, содержащей в себе великолепный математический аппарат. Это - дифференциальное исчисление, теория потенциалов, теория рядов, произведений, а также статистика и вероятностные законы.

Термодинамике мы обязаны теорией циклов, фазовых переходов и многим эффектам физической науки. Казалось бы, термодинамика - это одна из тех немногих наук, которые практически завершены в своей комплектации и являются замкнутым готовым моноблоком, где все начала и эффекты уже рассмотрены. Она как бы перешла в стадию насыщения, и требуются только мелкие уточнения для придания своеобразного лоска. Но это не так. Наука не может остановиться. Всегда есть вектор на её развитие. И видимо правомочно сказать, что этот моноблок, то есть замкнутый кусок, является лишь завершённым параграфом большого многотомного издания. Всегда должно быть продолжение. "Ведь конец - это чье-то начало!" Так говорил великий бард современности? Должно быть продолжение.

### Четвёртое начало термодинамики

Формулировка четвертого начала термодинамики следует из понятия движения. История механики связана с длительными спорами ученых о том, какая характеристика является мерой движения, в частности, является ли мера движения скалярной величиной или вектором. Спор этот имеет лишь исторический интерес, но именно в ходе этой дискуссии были введены две основные характеристики движения - кинетическая энергия и количество движения (импульс), которые играют центральную роль во всем построении механики. Следует отметить, что количество движения - термин, принятый в механике, а импульс - термин, принятый в физике. Оба они выражаются либо в виде вектора:  $\vec{j} = \rho \vec{V}$ , либо скаляра  $\rho \vec{V}^2/2$ . Вектор  $\vec{j}$  - это векторная величина и она по существу отличается от произведения обычного скаляра  $\rho$  (плотность) на вектор  $\vec{V}$  (скорость). Вектор  $\vec{j}$  есть полевая функция точки и по определению,

именно по определению В. А. Князева это - поток через замкнутую поверхность от введенного им тензора  $\text{div} K = \oint K \vec{n} dS$  [1].

Скаляр  $\rho \vec{V}^2/2$  - это кинетическая энергия системы. И так, получается, что интуитивно введенные в обиход два понятия - вектор импульса и скаляр кинетической энергии отвечают за описание понятия движения. Тогда спрашивается: когда отвечает какой? Может оба сразу? Или тот, который главнее? А кто главнее? Эти вопросы естественно встают перед учеными. И вот четвертое начало термодинамики отвечает на этот вопрос. Это начало показывает, что оба понятия - суть одно и то же. Одно определяется другим. Покажем это. Предварительно вспомним, что:

1) Внутренняя энергия идеального газа - это кинетическая энергия молекул. В данном случае ни вращательные, ни колебательные энергии газа не учитываются. Да ещё! Упомянем о том, что в соответствии с теоремой 1 (см. [2]) есть ещё торсионное движение. То есть применительно к молекулам внутри реальных газов в принципе могут существовать крутильные колебания. Эти колебания в идеальном газе также отсутствуют. И так! Внутренняя энергия идеального газа равна кинетической энергии молекул.

2) Классиками термодинамики Гиббсом, Гельмгольцем и др. была развита теория термодинамических потенциалов:  $F$  - потенциал Гельмгольца;  $G$  - потенциал Гиббса;  $\mu$  - химический потенциал;  $RT$  - большой потенциал и др. Внутренняя энергия также является термодинамическим потенциалом. То есть одна из мер движения есть термодинамический потенциал.

Теперь посмотрим на термодинамическую систему как на совокупность молекул с разными кинетическими энергиями

$$E_{ki} = \frac{c_i^2 m_i^2 V_i^2}{2} = \frac{\rho_i V_i^2}{2}$$

и тогда общая внутренняя энергия с весами будет записана:

$$\chi = \rho_1 \frac{\rho_1 V_1^2}{2} + \rho_2 \frac{\rho_2 V_2^2}{2} + \dots + \rho_i \frac{\rho_i V_i^2}{2} + \dots$$

В предыдущей работе [3] эта сумма обозначалась как молекулярно-кинетический потенциал. То есть  $\chi$  - это произведение плотности на внутреннюю энергию, то есть на термодинамический потенциал. Далее введем, как и в предыдущий раз [3], молекулярно-кинетический тензор, домножив потенциал  $\chi$  на единичный тензор. Определим поток этого тензора  $K$  изнутри через сферическую поверхность материальной точки диаметром 1000 Å. Поток тензора  $K$  определяет вектор субстанциональной производной от импульса  $j = \rho \vec{V}$

$$\frac{d\rho \vec{V}}{d\tau} = -\frac{1}{\rho} \oint K \vec{n} dS \quad \text{или} \quad \frac{d\vec{j}}{d\tau} = -\frac{1}{\rho} \text{div} K.$$

Последняя запись (см. [3]) является формулировкой четвертого

начала термодинамики:

$$\frac{d\vec{j}}{d\tau} = -\frac{1}{\rho} \operatorname{div} \rho U l.$$

Или при  $\rho = \text{const}$ :

$$\frac{d\vec{j}}{d\tau} = -\operatorname{div} U l.$$

**Формулировка.** Поток молекулярно-кинетического тензора от внутренней энергии молекул через поверхность материальной точки есть субстанциональная производная от вектора импульса потока.

Другими словами, производство импульса обязано его потенциальному началу - кинетической энергии газа (внутренней энергии термодинамической системы).

Однозначная связь импульса с кинетической энергией показывает на их инвариантность, а само Начало - на универсальность и статус закона.

Этот закон, по существу, характеризует переход потенциального движения в абсолютное движение.

### Следствие из четвертого начала термодинамики

В работе [4] было получено уравнение импульсов из первого и второго начал термодинамики:

$$T \operatorname{grad} S > \operatorname{grad} U + P \operatorname{grad} U + \xi \operatorname{grad} W.$$

Последний член, характеризующий любую другую работу (тепло) кроме работы расширения и формально записанный по аналогии с [5] в виде  $\xi \operatorname{grad} W$ , удобнее записать через большой потенциал  $RT$ :

$$\xi \operatorname{grad} W = RT \operatorname{grad} \frac{Q_p}{RT},$$

где  $Q_p$  - в частном случае может быть теплота реакции, а в общем случае любая теплота или работа (работа лоренцевской силы в плазме, энергия при термоядерном синтезе гелия из водорода на Солнце и т.д.).

В этом случае уравнение импульсов переписывается в отличие от [4] и будет более удобным для анализа:

$$\frac{d\vec{j}}{d\tau} = -\operatorname{grad} P + \frac{4}{3} \nu \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{j} - \nu \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{j} + P \operatorname{grad} \ln \left( \rho^{\frac{\kappa+1}{\kappa-1}} \cdot e^{\frac{ST}{RT} + \frac{Q_p}{RT}} \right).$$

Отметим, что это уравнение есть следствие четвертого закона термодинамики, так как оно получено с помощью основного соотношения.

Преобразуем учитывая возможность изобарно-изотермического процесса:

$$\frac{d\vec{j}}{d\tau} = -\operatorname{grad} P + \frac{4}{3} \nu \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{j} - \nu \operatorname{rot} \operatorname{rot} \vec{j} - P \operatorname{grad} \ln \left( T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \cdot e^{\left( \frac{Q_p}{RT} - \frac{ST}{RT} \right)} \right).$$

Распишем логарифм в виде:

$$\ln \left( T^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \cdot e^{\left( \frac{Q_p}{RT} - \frac{ST}{RT} \right)} \right) = \frac{\kappa}{\kappa-1} \ln T - \frac{Q_p}{RT} + \ln e^{\frac{ST}{RT}}$$

и обозначим правую часть как:

$$\ln K_p = \frac{\kappa}{\kappa-1} \ln T - \frac{Q_p}{RT} + \ln l.$$

Эту версию проанализируем далее с целью понимания физического смысла правого члена в уравнении импульсов.

### Закон действующих масс

Основное уравнение импульсов, полученное с помощью четвертого закона термодинамики, отличается от уравнения Навье-Стокса одним релаксационным членом. При отсутствии этого члена, например, когда течение равновесное или замороженное, уравнение превращается в строгом соответствии с правилами преобразования в уравнение Навье-Стокса.

Вот - цена гипотезы псевдоотверждения жидкой точки. Не доглядели за одним очень важным членом. Но! Это не беда. Обычно, когда решаются газодинамические задачи этот член не учитыва-

ют. Рассматривают течение замороженным или равновесным (по существу как Бог на душу положит) и далее начинают сводить концы с концами, объясняя себе, что они правы. А часто считают оба условия сразу и берут что-то среднее. Почему так получается? Потому, что при бесконечной скорости релаксации имеет место равновесное течение, а при нулевой - замороженное. К сожалению, реальный режим находится в промежутке, а значит от нуля до бесконечности. И

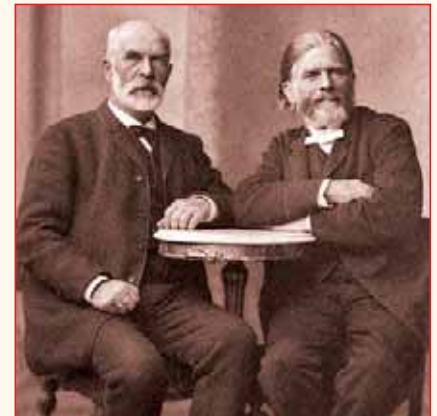


Вальтер Герман Нернст, немецкий химик

тут все происходит аналогично гетерогенному окислению, в каком режиме проходит процесс - в кинетическом или в диффузионном.

Для упомянутого случая все-таки удалось связать концы с концами, и была получена зависимость от числа Дамкеллера [6]. А здесь, к сожалению, критерия пока не найдено.

Итак, в промежутке между равновесием и оцепенением происходят термодинамические изменения. При наличии химических реакций, а это наиболее вероятно, очевидно, будет уместен закон действующих масс.



Като Максимилян Гульдберг, норвежский математик и физикохимик (слева) и Петер Вааге, норвежский физикохимик и минералог

Впервые закон действующих масс был выведен норвежскими химиками Гульдбергом и Вааге в 1867 г. из статистических соображений. Изложение вывода представлено в [7]. Рассматривалась обобщенная реакция



где символы слева относятся к веществам, вступающим в реакцию, справа, образующимся во время реакции.

По правилам теории вероятности сложного события, встреча одного компонента реакции с другим пропорциональна числу наличных молекул. Это в свою очередь означает пропорциональность числу молекул этих молекул, а для идеального газа парциальным давлениям. Другими словами вероятность выразится как произведение:

$$P = \alpha \cdot P_1^{\nu_1} \cdot P_2^{\nu_2} \cdot \dots,$$

где коэффициент пропорциональности зависит от температуры и давления.

Вероятность вступления в реакцию молекул разного сорта запишется аналогично:

$$P' = \alpha' \cdot P_1^{\nu'_1} \cdot P_2^{\nu'_2} \cdot \dots$$

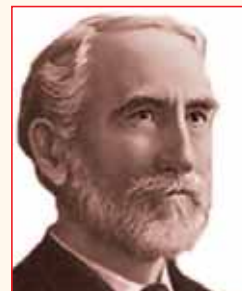
В состоянии равновесия число молекул каждого сорта очевидно стационарно и процесс должен идти столь же часто как в одну, так и в другую сторону, тогда записывается константа равновесия:

$$K_p = \frac{P_1^{\nu_1} \cdot P_2^{\nu_2} \cdot \dots}{P_1^{\nu'_1} \cdot P_2^{\nu'_2} \cdot \dots}$$

Записывая её через логарифм, получаем:

$$\ln K_p = \sum \ln P_i^{\nu_i}$$

Аналогичный вывод с термодинамических позиций был сделан Гиббсом. Воспользовавшись термодинамическим



Джозия Уиллард Гиббс, американский математик и физикохимик

потенциалом Гиббса и найдя условие равновесия как его минимум, Гиббс получил зависимость для логарифма константы равновесия в виде:

$$\ln K_p = \frac{\Delta C_p}{R} \ln T - \frac{Q_p}{RT} + \ln I.$$

Здесь  $\Delta C_p / R$  - функция, характеризующая степень при температуре. Точная запись по Гиббсу

$$\Delta C_p = \sum_{h=1} v_h C_{ph}$$

выражает комбинацию теплоемкостей компонентов при постоянном давлении.

Величина  $I$  в уравнении Гиббса зависит от энтропий составляющих смесей как

$$R \ln I = \sum_{h=1} v_h S_{oh}.$$

Анализ уравнения Гиббса показывает, что оно в точности совпадает с правым членом вновь полученного уравнения импульсов.

Это означает, что правый член нового уравнения является релаксационным и не противоречит закону действующих масс. **□**

#### Литература

1. В.А. Князев. Гидродинамика без гипотезы псевдоотвердения жидкой точки // Изд. LAP LAMBERT Academic Publishing, Германия, 2014 г.
2. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Торсионно-волновая парадигма // Двигатель. № 4. 2011 г.
3. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Молекулярно-кинетический тензор // Двигатель. № 1. 2016 г.
4. Ю.М. Кочетков. Турбулентность. Вывод уравнения импульсов из начал термодинамики // Двигатель. № 3, 2016.
5. В.В. Сычев. Дифференциальные уравнения термодинамики // М. Наука, 1981 г.
6. Ю.М. Кочетков. Турбулентность в СЭДУ // Двигатель. № 2. 2011 г.
7. П.С. Эпштейн. Курс термодинамики // ОГИЗ. Гостехиздат, 1948 г.

Связь с автором: [swgeorgy@gmail.com](mailto:swgeorgy@gmail.com)

## ИНФОРМАЦИЯ

Компания Jaguar Land Rover объявила о расширении линейки двигателей Ingenium, которые будут устанавливаться как на текущие, так и на будущие модели британских автомобилей. Новые модификации станут частью долгосрочной стратегии компании по сокращению выбросов в атмосферу, снижению расхода топлива, а также внедрению более эффективных и альтернативных силовых агрегатов.

Ключевым элементом данной стратегии является новый четырехцилиндровый бензиновый двигатель Ingenium, выпуск которого начался в специализированном производственном центре Jaguar Land Rover, строительство которого обошлось в 1 млрд фунтов стерлингов. Этот мотор, созданный с нуля в Великобритании, является самым технологичным за всю историю компании. По сравнению с предыдущими поколениями силовых агрегатов, мощность двигателей Ingenium выросла на 25 %, а расход топлива сократился на 15 %.

Одновременно с разработкой новых двигателей, компания Jaguar Land Rover разработала новую автоматическую трансмиссию, которая не только повысила экономичность новых моделей. Трансмиссия под названием TRANSCEND отличается очень широким диапазоном передаточного числа - 20:1, что повысило внедорожные качества автомобилей и одновременно снизило расход топлива практически на 10 %.

Новые двигатели Ingenium, а также автоматическая трансмиссия TRANSCEND, позволят будущим автомобилям Jaguar Land Rover значительно сократить выбросы CO<sub>2</sub>, которые к 2020 г. будут снижены ещё на 25 %.

Бензиновый двигатель Ingenium получил ряд современных технологий, включая электрогидравлический газораспределительный механизм, объединенный коллектор выхлопной системы и турбоагрегат



типа Twin Scroll с керамическими шарикоподшипниками. Новый двигатель отличается превосходной динамикой, экономичностью и плавностью работы, соответствуя самым строгим международным требованиям по контролю выбросов.

Стандартная конструкция с рабочим объемом 500 см<sup>3</sup> на цилиндр позволяет добиться максимальной адаптивности двигателя к различным автомобилям - от спортивных седанов до роскошных внедорожников.

Вслед за 2,0-литровыми четырехцилиндровыми дизельными двигателями, появившимися на рынке в 2015 году, новые бензиновые версии Ingenium поступят в серийное производство и в продажу в 2017 году.

Трансмиссия TRANSCEND - восьмиступенчатая трансмиссия с широким диапазоном передаточных чисел (20), что почти в два раза больше, чем у стандартных восьмиступенчатых трансмиссий. При массе в среднем на 20 кг меньше, чем у аналогичных трансмиссий, TRANSCEND может использоваться как на заднеприводных, так и на полноприводных автомобилях с продольным расположением двигателя. Трансмиссия TRANSCEND обеспечит невероятную динамику автомобиля - с новой транс-

миссией маневрирование и движение по бездорожью станет легче, а на трассе водители смогут наслаждаться улучшенной динамикой при сниженных выбросах CO<sub>2</sub>".

Программа TRANSCEND, имеющая частичное финансирование от правительства, нацелена на то, чтобы возродить производство трансмиссий в Великобритании через инвестиции в разработку более легких компонентов и менее энергоемких производственных процессов, а также поддерживать экспорт гибридных технологий.

Компания Jaguar Land Rover инвестировала существенные суммы в разработку новых технологий и инноваций по защите окружающей среды. Стратегия по сокращению выбросов и расхода топлива напрямую связана с усовершенствованиями конструкций двигателей, сохранением лидерства в производстве легких автомобилей и консервацией энергии в автомобилях без ущерба для их дорожных и динамических качеств.

С 2008 года компания Jaguar Land Rover удвоила штат разработчиков двигателей, а также сделала серьезные инвестиции в развитие новых силовых агрегатов. Сегодняшней задачей команды инженеров является создание технологии, способной снизить выбросы CO<sub>2</sub> на 25 % за ближайшие 5 лет.

Компания Jaguar Land Rover продолжает стратегию по электрификации своего модельного ряда. Подтверждением долгосрочных перспектив компании в сфере электрических силовых установок стало участие Jaguar в одном из самых инновационных автомобильных чемпионатов - Формуле-Е. Этот проект позволит компании выйти за привычные границы электрических технологий и испытать новейшие разработки в реальных условиях трека, чтобы затем перенести их на дороги общего пользования, интегрируя их в свои автомобили. **□**