ПУБЛИКУЕТСЯ В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ

УДК 533.6.011:51

В. Д. Мальшаков,
РФЯЦ-ВНИИЭФ

НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА МЕТОД ГОДУНОВА

Обсуждается применимость принципа близкодействия к расчету газодинамических процессов.

В статье рассматриваются три философских факта. Их формулировка состоит в следующем:

1. Темп научного познания природы существенно зависит от того, какая у общества уже имеется парадигма, которую принято называть господствующей.

2. Если согласиться с формулировкой принципа близкодействия: «Переход каждого лагранжева объема физической среды в свое очередное состояние должен опираться исключительно на текущий ресурс этого объема и его ближайшей окрестности, динамика которых вовсе не требует от его среды свойства дифференцируемости», то этот темп заметно бы ускорился.

3. Смена текущей парадигмы на очередную господствующую в обществе свершается крайне осторожно и в этой связи чрезвычайно редко.

Применяя первый и третий из перечисленных фактов непосредственно к текущему моменту, можно трактовать их следующим образом. Любой экспериментальный результат, в том числе и вычислительный, допускает интерпретацию, либо легко вписывающуюся в господствующую парадигму, и тогда он наверняка будет признан научным, либо туда не вписывающуюся, и тогда он рискует быть обвиненным в принадлежности лженауке, что на протяжении всей истории общества использовалось в борьбе за удержание монополии на распространение выгодной кому-то истины.

Раздел 1 полностью посвящен демонстрации второго философского факта, который для яркости ниже будет выделяться под сигнатурой *новый принцип*.

1. Метод Годунова и новый принцип

Применение второго философского факта к газовой динамике свидетельствует, что классическое представление записи системы ее уравнений в дифференциальной форме превратилось в анахронизм и должно быть исправлено на триаду

$$(u_1 - u_2)^2 = (p_2 - p_1)(V_1 - V_2)\,, \qquad (*.1)$$

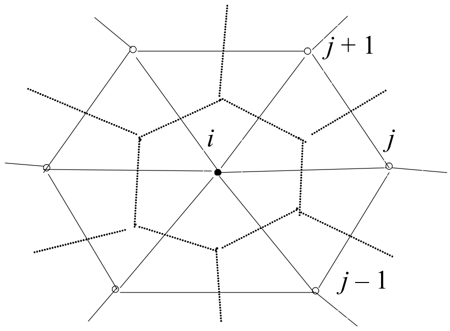
$$e_1 - e_2 + \frac{1}{2}(V_1 - V_2)(p_1 + p_2) = 0\,, \qquad (*.2)$$

$$p = \Pi(e, \rho)\,. \qquad (*.3)$$

Ее первые два члена представляют пару соотношений Ренкина–Гюгонио, а третий из них – замыкающее эту пару уравнение состояния сплошной среды.

Метод Годунова эту триаду использует также, но лишь в решении задачи о распаде произвольного разрыва в эйлеровых сетках, для которых в каждой такой задаче с индексами 1 и 2 связываются два берега ее искусственного разрыва [2].

Но при видении в этой триаде системы уравнений для распада разрыва ничто не мешает в газовой динамике трактовать ее в качестве физической интерпретации последней. Чтобы продемонстрировать это, обратимся за помощью к рисунку, где приведена понятная для всех знакомых с методикой «Медуза» графическая схема ее сеточного шаблона.



Сеточный шаблон «Медуза»

Общий смысл этой схемы состоит в следующем: текущую счетную точку символизирует индекс i, ее текущего соседа – индекс j, замкнутый штрих-пунктирный многоугольник – границу соответствующей ей счетной ячейки. То, что эта схема плоская, символизирует общий случай (подразделение газодинамик, имеющих всю информацию в счетной точке, на одномерные, двумерные и трехмерные – вещь совершенно банальная, отражающаяся только на алгоритме вычисления для «счетной ячейки» ее объема). В соотношениях Ренкина–Гюгонио этот объем обозначен как V с индексом, два значения которого связывают старое и новое значения величины текущего объема счетной точки.

Отношение массы счетной точки к этому объему дает величину текущей плотности этой точки ρ. Поскольку текущее состояние p_1, V_1, e_1, υ_1 счетной точки задано, а очередное состояние имеет четыре неизвестные p_2, V_2, e_2, υ_2 , то к системе (*.1)–(*.3) надо добавить нечто ее замыкающее. Следствия второго закона Ньютона – изменение количества движения (или импульса) под действием внешней силы $\vec{f}$: $\vec{p} = m\vec{\upsilon}$, $\dot{\vec{p}} = \vec{f}$ (*.4), очевидно, и должны это нечто представлять. Но для методики, которая на этих следствиях изначально и базировалась, прокомментировать такой вопрос ничего не стоит. Для этого лишь достаточно неявно присутствующий в формулах (*.1)–(*.3) параметр времени t заменить приращением Δt и принять его за интервал действия внутренней и внешней сил $\vec{p}$, $\vec{f}$, а их величины выписать как линейные интерполяции по текущей счетной точке и ее текущим соседям. Добавление же к трем соотношениям (*.1)–(*.3) пары соотношений из (*.4) дает алгебраически замкнутую систему уравнений для пяти неизвестных величин: p_2, e_2, ρ_2,

u_2, Δt. То, что предпоследняя из них в общем случае есть вектор, не имеет значения: каждая его компонента добавляется независимо.

Но это не единственное следствие такой метаморфозы. Рассматривая для того же сеточного шаблона аналог постановки одноточечной газодинамической задачи и помня, что эта постановка, в ее классическом варианте, сводится к выбору в ее области определения – в счетной ячейке (или в классической интерпретации этой методики – в области влияния счетной точки), надо задать начальные условия, а вдоль границы области влияния этой точки – граничные условия. Чтобы поставить последние, достаточно из классической газодинамики вспомнить о двух основных типах граничных условий – **заданное давление** и **заданная скорость**. Но зная значения переменных p_1, ρ_1, e_1, υ_1 в текущей счетной точке и ставя вдоль границы области влияния любое распределение этих основных типов, а в роли начального условия – прежние значения переменных p_1, ρ_1, e_1, υ_1, очевидно, можно с любой точностью из системы (*.1)–(*.4) найти значения p_2, ρ_2, e_2, υ_2. Отсюда следует, что интегральная точность решения одноточечной задачи будет зависеть, во-первых, от степени точности уравнения состояния среды, во-вторых, от точности начальных и граничных условий ее постановки, и в-третьих, от степени точности их аппроксимации на принципе линейной интерполяции.

Распространяя далее эту же постановку на произвольное число счетных точек и подменяя метод ее решения для каждой счетной точки методом решения задачи распада разрыва на границе области влияния каждой счетной точки, логично будет задаться вопросом, к чему должно приводить неограниченное возрастание плотности числа счетных точек. Для меня, например, ответ очевиден – к удовлетворению системы (*.1)–(*.3) в каждой точке области решения задачи, в то время как для авторов [1] и посвященной методу Годунова монографии [2] было бы логичнее заявить – к решению «квазилинейного уравнения гиперболического типа».

Я пришел к выводу, что роспись системы (*.1)–(*.4) на сеточном шаблоне счетной точки методики «Медуза» равносильна применению к ней одной из модификаций уже широко распространившегося в мире метода Годунова. В чем же состоят особенности этой модификации в применении к сеточному шаблону методики «Медуза»?

Если подходить к этому вопросу формально, то можно выделить две особенности. Первая из них – его применение всегда и лагранжево и неявно. Соответственно вторая особенность – счетная ячейка допускает свою интерпретацию как оперативную конструкцию, минимальное время существования которой ограничено текущей величиной счетного шага, а максимальное – может согласовываться с актами смены соседства таким образом, чтобы эта смена не отражалась на значениях текущих физических характеристиках счетных точек e и ρ.

Если же подходить к этому вопросу неформально, то добавляются еще две особенности. Первая из них – это пример сплошной среды, неразрывность для которой не нуждается в постулате дифференцируемости: уже сам постулат близкодействия, без достаточного в материальных точках этой среды ресурса кинетической энергии, мешает ей разрываться. Еще одна особенность, соответственно, дает математический пример динамической задачи только с начальными условиями.

В итоге первая формальная особенность сулит адекватно модифицированной методике полное избавление от ее прежней немонотонности и, как следствие, от операции раздвижки; вторая формальная особенность соответственно сулит ей избавление от необходимости иметь смешанные ячейки, а не формальные особенности, а также и то, что предельная точность метода Годунова совпадет с точностью уравнения состояния сплошной среды, или, что то же самое, сулит свойство самой точной из когда-либо существовавших до нее методик численного решения газодинамических задач плюс возможность динамического разбиения области решения задачи по фронтам распространения в ней возмущения на несчитабельные и считабельные подобласти и, как следствие, самой экономной методики по числу операций на счетную точку.

Макнамара (1966, 1967) применял модифицированный метод Годунова. Первый предварительный шаг осуществлялся здесь при помощи лианизированного решения задачи о распаде разрыва (слабого) на подвижной двумерной эйлеровой сетке, периодически подстраиваемой под перемещение контактного разрыва. Макнамара указывает, что неточность формы скачка, состоящая в появлении у него точки возврата вблизи проходящей через точку торможения линии тока, вызвана несогласованностью при расчете движения сетки.

Комментируя это, я не сомневаюсь, что его автор, как и соавторы монографий [1] и [2], не могли не исходить из господствующей сейчас классической парадигмы, в соответствии с которой сплошная среда обязана описываться дифференциальными либо выводимыми из них интегральными соотношениями. Как следствие, здравствуя под крышей классической парадигмы, этот метод до сих пор вынужден «бросать в ноги» второму началу термодинамики правило замены в областях разрежения адиабаты Гюгонио на адиабату Пуассона. Только как можно верить в то, что в физическом явлении факты подтверждений второго начала термодинамики однозначно приходятся именно на газодинамическую долю явления? Намного проще согласиться с тем, что всякое наблюдение за физическими явлениями дает лишь совокупный результат. Но тогда для выделения из физического явления газодинамической компоненты вполне достаточно представить ее лишь системой (*.1)–(*.3), а отличию решения этой системы от результата наблюдения приписать результат совокупности всех остальных в этом явлении процессов. Пусть эта совокупность для простоты сводится лишь к процессу теплопроводности. Тогда, следуя традиционной для нас схеме расщепления явления по физическим процессам и зная из термодинамики, что для уравнения состояния этой среды существуют только два свободных параметра, которые в (*.1)–(*.3) представлены обозначениями e – внутренняя удельная энергия и ρ – плотность, и что направление любого теплового потока обратно направлению градиента температуры среды, мы можем трактовать энтропию лишь только как чисто математическое понятие. Следовательно, единственная его функция для ортодоксальной газовой динамики – ограничивать область ее определения участками разрежения. Впрочем, и выделение самих этих участков обходится без вычисления энтропии. В результате вся суть второго начала термодинамики в его приложении к газовой динамике сводится к псевдообоснованию смены аппроксимации ее течения для участков разрежения среды адиабатой Гюгонио на аппроксимацию этого течения адиабатой Пуассона, которые, как известно из [4], будучи выпущенными из одной и той же точки, имеют второй порядок касания. Этот фактор и позволяет классической газовой динамике, вывод системы уравнений которой опирается на без труда просматривающееся использование принципа дальнодействия, легко блокировать видение в тройке (*.1)–(*.3), полученной вообще без привлечения этого принципа, более естественной интерпретации.

Но в такой трактовке интерпретация понятия аппроксимации задачи ставится с ног на голову: «Как для даваемой триадой (*.1)–(*.3) физической постановки задачи найти наиболее точное ее математическое приближение на пути аппроксимации этой постановки системой уравнений классической газовой динамики?» И как следствие, факт равносильности первой пары этой тройки тройке фундаментальных законов сохранения, в рассуждении о первом порядке метода Годунова, надо применить не к нему, а к тем дифференциальным системам, которые эти законы сохранения аппроксимируют. Сейчас торжествует мнение: эта система как раз и выведена из фундаментальных законов сохранения. Но важная добавка, «и принципа дальнодействия» вообще не произносится.

Ради простоты, проводя мысленно этот анализ на качественном уровне, не трудно дать общую структуру предельного решения этого метода в следующем описании: 1) в каждой точке области сплошной среды удовлетворяется ее уравнение состояния; 2) геометрическое место точек касания к адиабатам Пуассона в этой среде выстилает совокупное тело участков разрежения; 3) геометрическое место точек касания к ее адиабатам Гюгонио аналогично выстилает совокупное тело участков сжатия; 4) далее, геометрическое место всех остальных точек области сплошной среды объединяет в себе все точки границы участков разрежения и сжатия, а также точки, не меняющие свое термодинамическое состояние; 5) при этом наиболее общим свойством для окрестностей всех точек области решения задачи служит их непрерывность и во времени и в пространстве. Переходя к вычислительной стороне этого метода, сначала придется всю область течения мысленно дискретизировать, а для представления ее текущего состояния в соответствующих элементах дискретизации выполнить интегрирование, а его удельный результат также мысленно приписать самим элементам этой дискретизации. Но этот удельный результат будет ограничивать точность задействованных в методе Годунова адиабат Гюгонио и Пуассона. Качественное отличие от него всех альтернативных методов будет выражаться в том, что эти адиабаты подменяются грубым механизмом математических вязкостей, формулы и параметры к которым сами подбираются из каких-то вычислительных экспериментов. При этом в разработке и остальной части этих методов главный упор в их оценке также делается на вычислительный эксперимент. В таких методах совсем не просто отделить чистую теорию от вычислительно-экспериментальной части. В отличие от них метод Годунова является чисто теоретическим, а его уникальность – это демонстрация всем изобретателям альтернативных методов численного решения задач газовой динамики, расчетов вообще без привлечения понятия вязкости. Тем не менее в чистом виде этот метод, неявно совмещая в себе оба принципа – как близкодействия, так и дальнодействия, не может быть логически последовательным.

Существование в газовой динамике двух адиабат (Пуассона и Гюгонио) – это всего лишь исторический факт. Первая из них родилась в термодинамике как следствие записи ее первого начала в форме $de + pdV = 0$, т. е. до открытия закона сохранения и превращения энергии. Вторая же была обнаружена ближе к концу XIX в. как следствие уже всех известных в физике к тому времени законов сохранения. Удивительное свойство этих двух адиабат касаться друг друга в точке их пересечения позволяет разбить получаемые с помощью разностной аппроксимации этих адиабат решения задач на два класса. Те из них, которые опираются только на адиабаты Пуассона (т. е. на свойство среды быть в большинстве своих точках дифференцируемой), в настоящее время естественно отнести к *математическому* *классу*, а те, которые опираются только на адиабаты Гюгонио (т. е. на свойство среды вообще не требовать от себя дифференцируемости), – к *физическому*.

Как следствие, возврат к выше приведенной цитате из [3] однозначно требует вывода, что метод Годунова, имея дело с обеими адиабатами, при дискретизации вынужден каждую из них аппроксимировать численно и, как следствие, второй дифференциальный порядок касания в конечных разностях уменьшать до первого порядка аппроксимации. Но, очевидно, это лишь следствие объявления физичности сразу обеих адиабат. Ибо признание в качестве единственной любой из этих адиабат ставит вопрос аппроксимации задачи в конечных разностях автономно: при предельно плотной дискретизации сплошной среды, в каждой ее точке должно строго удовлетворяться лишь уравнение состояния этой среды.

Но тогда здравый смысл подсказывает объявить триаду (*.1)–(*.3) *фундаментальной.* Что это означает? Во-первых, рис. 53 и 54 [4, с. 458] показывают, что общее физическое состояние параметров p и V на двух адиабатах может иметь только точка их пересечения. Отсюда неизбежно следует, что изменение состояния среды при перемещении вдоль этих адиабат не может не иметь разный масштаб меры изменения $p{\cdot}dV$. Но только при перемещении по адиабате Гюгонио этот масштаб по определению отвечает мере изменения энергии. В альтернативном случае, ему, также по определению, соответствует мера изменения энтропии. Иначе говоря, обе адиабаты следуют из тройки законов сохранения. Только третий для каждой из них – свой. Для адиабаты Гюгонио – это закон сохранения энергии, а для адиабаты Пуассона – соответственно закон сохранения энтропии. Во-вторых, глядя на набор шести переменных первого для этой триады соотношения u_1, u_2, p_1, p_2, V_1, V_2, естественно обратить внимание на то, что все они наиболее понятны и интуитивно физически измеримы. Соответственно, глядя на набор переменных e_1, e_2, V_1, V_2, p_1, p_2 второго соотношения, можно обратить внимание на то, что знание последних четырех величин позволяет вычислить разность для первых двух и, как следствие, ясно почувствовать относительность этой величины и что функциональная зависимость третьего члена триады может быть раскрыта на основе двух первых членов этой триады с помощью грамотно продуманного эксперимента. В-третьих, нельзя не обратить внимание на то, что среди названной тройки измеримых величин u, p, V нет ни температуры T, ни кинематической вязкости ν. Но интуитивно ясно, что из тройки величин e, ρ, p строится функциональная зависимость $p = \Pi(e,\rho)$, из тройки величин e, ρ, T может быть попутно построен аналог $T = \Xi(e,\rho)$. И простор для расщепления физического явления на газодинамический и теплопроводный процессы открыт. Распространяя далее концепцию этого расщепления на вязкие процессы на базе первых двух соотношений триады, по-видимому, можно получить и для кинематической вязкости ν какое-то функциональное соотношение, правая часть которого может уже иметь новые, зависящие от динамики u и его градиента аргументы. Однако эта процедура много выиграет, если ее физическая часть погружена в некую интеллектуальную среду вычислительного эксперимента.

И тогда для темы предыдущего абзаца логически вытекает следующее продолжение. Ориентация вычислительного метода газовой динамики на использование лишь адиабаты Гюгонио соответствует ставке на аппроксимацию закона сохранения энергии, т. е. ставке на физический подход. Таким образом его ориентация на использование лишь адиабаты Пуассона – есть ставка на аппроксимацию закона сохранения энтропии, т. е. ставка на математический подход. Одним словом, оборот: «Схема Годунова является двухшаговой схемой *первого порядка…*» [3, с. 381] имеет лишь только констатацию устаревшей оценки.

Тем не менее парадокс состоит в том, что для всех уже давно не секрет, что вывод как классической системы уравнений газовой динамики, так и соотношений Ренкина–Гюгонио опирается на одни и те же фундаментальные законы сохранения. Правда, в первом случае оговорка о существовании и непрерывности всех нужных частных производных все же иногда проскальзывает. Но эти производные – все же чисто математическое понятие, а возведение класса дифференциальных уравнений сплошной среды в разряд «уравнений математической физики» мало кого способно убедить, что это название делает их менее математичными.

Просматривая сейчас любой материал из области теоретической или математической физики, в том числе и самый свежий, можно обратить внимание на две вещи: а) сам факт какого-либо различия понятий «математический» и «физический» не оговаривается; б) ничего явно не говорится и о различии понятий «дальнодействие» и «близкодействие». Однако эти различия с философской точки зрения крайне принципиальны. Так, ничего не говоря о понятии «дальнодействие», автор [5] в *§ 14. Законы сохранения*, говоря о законе сохранения массы в уже ранее встречавшейся дифференциальной форме, на с. 186-187 уточняет: «Обычно он формулируется в виде интегрального тождества

$$\iiint\limits_{\partial\Omega} \rho dx_1 dx_2 dx_3 + \rho u_1 dx_2 dx_3 dt + \rho u_2 dx_3 dx_1 dt + \rho u_3 dx_1 dx_2 dt = 0,$$

которое должно быть выполнено по замкнутой трехмерной гиперповерхности $\partial\Omega$, ограничивающей какую-либо трехмерную (x_1, x_2, x_3, t) область Ω. Эта область может быть произвольной». Что же касается текущего состояния в ней физических параметров, то об этой стороне дифференциальных законов сохранения вообще ничего не говорится. Но это и означает, что временной фактор из таких законов априори выключен и всегда они обязаны быть, как и в классической термодинамике, лишь квазистатическими. Но в такой интерпретации динамических законов принято говорить о мгновенном распространении взаимодействий, или иначе – о принципе дальнодействия. Но корректно ли упрекать автора [5] за веру в ортодоксальную парадигму? Ведь в этом отношении не менее неосторожны и все остальные приверженцы современных представлений о физической науке. Так, даже название самого пункта в [4] *§ 85. Ударная адиабата*, посвященного выводу двух первых членов триады (*.1)–(*.3), т. е. соотношений Ренкина–Гюгонио, не может допустить кривотолков: основные уравнения в механике сплошной среды обязаны быть лишь только дифференциальными. Ведь их вывод из алгебраической формы записи, как и вывод для газовой динамики классической записи ее уравнений, имеет общую качественную основу – три закона сохранения. Как было уже показано, общие из этой тройки лишь два закона. Более внимательный просмотр того же первоисточника свидетельствует, что в основе классической формы лежит лишь вера в выполненность условий математической теоремы Остроградского–Гаусса. Однако это не более чем исторический анахронизм, ибо в *§ 2. Уравнение Эйлера* на с. 16 [4] есть справка о том, что оно впервые установлено Л. Эйлером в 1755 г. для движения жидкости. Впрочем, есть у меня информация и о том, что дифференциальный вид второго уравнения – уравнения неразрывности был впервые предложен все тем же Л. Эйлером. А это значит, что в своих выводах он мог руководствоваться исключительно собственной интуицией. Только последующее развитие науки привело к открытию теоремы Остроградского–Гаусса и законов сохранения, к рождению ранее неизвестной научной дисциплины – *термодинамики*, двух ее ключевых понятий – *необратимый процесс*, *энтропия*, а также к обнаружению двух адиабат – *Пуассона* и *Гюгонио*. Тем не менее форма для уравнений Эйлера, привычная для его гидродинамики, в соответствии с классической парадигмой, оказалась экстраполированной на первое начало новой научной дисциплины. В итоге оно и приобрело вид $de + p \cdot dV = 0$. Однако, в отличие от гидродинамики, эта новая дисциплина статус квазиравновесной приобрела сразу, а результат интегрирования ее первого начала породил понятие адиабаты Пуассона. Есть еще одно название у этой адиабаты – *изоэнтропа*. Процесс, диаграмма состояний которого лежит на этой адиабате, получил название обратимого, а процесс, текущее состояние которого опускается ниже ее, в свою очередь, статус физически невозможного, причем настолько настойчиво, что это отразилось на еще одном названии для второго начала этой новой дисциплины – *закон неубывания энтропии*. Нарушение этого закона было объявлено эквивалентным вере в вечный двигатель второго рода. Между тем из вышеизложенного следует: 1) за первым началом термодинамики лежит не закон сохранения и превращения энергии, а закон сохранения энтропии; 2) обратимому процессу отвечает движение как вдоль адиабаты Пуассона, так и вдоль адиабаты Гюгонио; 3) термодинамические законы – это есть математическое отражение следствия постулата квазиравновесности, которому в динамическом варианте соответствует математическое отражение принципа дальнодействия; 4) движению по адиабате Гюгонио с нарушением второго начала термодинамики соответствует не вера в постулат вечного двигателя второго рода, а здравое согласие с *новым принципом* близкодействия и с постулатом существования волн-солитонов.

2. Моя реакция на рецензию Ю. А. Бондаренко

В предисловии редакции к этой статье сказано, что первоначальный вариант текста этой работы редакция журнала не решалась публиковать более двух лет, но об этой работе все же вспомнили и предложили сократить ее, чтобы опубликовать вместе с текстом рецензии Ю. А Бондаренко, под влиянием которого работа оказалась «арестованной». Но прежде его рецензия под названием «Рецензия на отчет Мальшакова. В. Д. “Волна разрежения Ренкина–Гюгонио”» имела характер внутреннего научного отчета за 1999 г. И предложение опубликовать содержимое этого отчета для вынесения на суд читателей для его автора никак не могло не быть неожиданным. В итоге от прежней рецензии осталась лишь бледная тень. Как следствие, главное возмущение и недовольство рецензента из-за покушения на его веру в распространимость второго начала квазиравновесной термодинамики на предельно неравновесную газовую динамику от суда потенциальных читателей журнала скрылось. Чтобы как-то восстановить истинную ситуацию, я все же беру на себя смелость воспроизвести из вышеназванного отчета два его ключевых абзаца. Один из них – это первый абзац вводного подраздела с названием «Общая характеристика (первое впечатление)»:

«Рецензируемый отчет посвящен возможности отказаться от принципа неубывания энтропии, т. е. возможности нарушения второго закона термодинамики, в газодинамических процессах. По этой причине рецензию на указанный отчет можно было бы ограничить ссылкой на редколлегию Журнала технической физики, которая считает нецелесообразным вести дискуссию о справедливости второго начала термодинамики на страницах журнала и напоминает об этом авторам. К сожалению, возможная дополнительная ссылка на решение Парижской академии наук от 1755 г. о прекращении приема проектов вечного двигателя не проходит, т. к. в этом решении имелись в виду только вечные двигатели первого рода, нарушающие первый закон термодинамики, а нарушение второго начала термодинамики эквивалентно существованию вечных двигателей второго рода. Эта эквивалентность закона неубывания энтропии и невозможности вечных двигателей второго рода подробно и точно обоснована в книге (Компанеец А. С. Законы статистической физики. Ударные волны. Сверхплотное вещество. М. : Наука, 1976) на с. 11–66, хотя без формальной строгости на уровне, почти доступном увлекающимся физикой школьникам старших классов и вполне доступном студентам младших курсов. Отметим, что эту книгу автор рецензируемого отчета неоднократно цитирует, правда, совсем по другому поводу (точнее, без всякого на то повода)».

Соответственно другой абзац – первый в *Заключении* вышеназванного отчета-рецензии:

«Можно сказать, что главная ошибка автора рецензируемого отчета заключается в том, что второе начало термодинамики, т. е. закон неубывания энтропии, по своему происхождению и смыслу, не может быть доказан, опровергнут или подвергнут сомнению в рамках такой прикладной науки, как газовая динамика и теория ударных волн. Здесь закон неубывания энтропии используется только как постулат. Второе начало термодинамики (закон неубывания энтропии) доказывается в рамках статистической физики и термодинамики как части статистической физики (Базаров И. П. Термодинамика. М. : Высшая школа, 1991), и поэтому его доказательство может подвергаться сомнению только в рамках данной физической науки (конечно, с возможным привлечением результатов прикладных наук). То есть автор рецензируемого отчета подверг сомнению закон неубывания энтропии без всяких на то оснований, работая только в рамках газовой динамики, без привлечения статистической физики. Это и есть главная ошибка, которая не позволила автору критически отнестись к неправильным (в силу наложения технических и логических ошибок в разделах 2 и 3) результатам, полученным в “доказательстве”, приведенном вслед за формулировкой “теоремы 2”».

Пробуя сравнить характер содержимого первого абзаца рецензии на статью с первым абзацем *Общей характеристики*, можно уловить нечто общее – он играет роль введения рецензии. Причем с самого начала в ход пускаются собственные догадки и рассуждения рецензента, и на пустом месте вырастает наиболее экономное и доступное его мыслительным усилиям сочинение с рекомендацией, в зависимости от складывающейся для него ситуации, меры пресечения еретика. Хотя для публикуемого варианта в таком приеме нет ничего странного: рецензия априори должна быть отрицательной, все же узнать о реакции автора статьи на такую рецензию, несмотря на ее спекулятивный и вымышленный характер, потенциальному читателю не может не быть любопытным.

Ограничивая разглашение тайны «внутренней» оценки моей «лженаучной» работы двумя вышеприведенными цитатами, я сразу перейду к отражению нападок рецензента на предыдущую статью. Просматривая текст рецензии в обратном направлении, нельзя не заметить, что соотношений вида $F(u_1, V_1, e_1, p_1, D_1, u_2, V_2, e_2, p_2, D_2, u, V, e, p, D) = 0$, читатель в тексте рецензируемой статьи вообще не найдет. Между тем из рецензии следует, что рецензент «выдавливает» из себя наивного простачка, жалующегося на то, что «предмет и цель исследования» в статье ясно не определены, как будто текст аннотации статьи им вообще не был замечен. Предположив, что речь идет о дифференциальных уравнениях, он не желает понимать причину, почему «вообще отсутствует апелляция к уравнениям газовой динамики». Другими словами, то, что они могут быть и вовсе не классическими, – выше порога представлений рецензента о газовой динамике. В свете этого надо и объяснять непонимание рецезентом логики доказательства теоремы 2. Ловко исполняя роль глубоко верующего в применимость постулатов термодинамики к газовой динамике, он свои выводы подкрепляет ссылками на авторитетных в этой области знаний единоверцев. Вот пример использования такого казуистического приема во втором абзаце рецензии: «Если уравнение состояния не обязано удовлетворять условиям Бете–Вейля, то вполне допустимы *ударные волны разрежения* со всей сложной спецификой возникающих при этом проблем (но при этом без нарушения закона неубывания энтропии – см., например, [1])». Здесь курсивом выделено абсурдное для меня словосочетание, свидетельствующее о том, что рецензент полностью проигнорировал в статье не только текст аннотации, но и вводный раздел 1, ибо волну разрежения в разделе 3 никак нельзя назвать «ударной волной разрежения». В то время как слово *разрежение* вызывает ассоциацию растяжения, сочетание *ударная волна* должно вызывать ассоциацию сжатия. В моих же представлениях волн – как разрежения, так и сжатия – есть нечто реальное и всегда непрерывное, а ударная волна – нечто абстрактное и разрывное. Итак, применение выделенного выше словосочетания к реальной среде для меня не приемлемо. Сверх того, уже в первой посылке моего доказательства **теоремы 2 –** гипотезе отсутствия распространения возмущения вверх по неполочковой части профиля – легко просматривается столь нужный в конце XIX в. для физики и уже сформулированный мной выше принцип близкодействия – *новый принцип*. По-видимому, отсутствие в то время такого принципа и было следствием того, что тогда соотношения Ренкина–Гюгонио были осмыслены лишь для эйлеровой системы координат. Как следствие, не могло найтись и сомневающихся в существовании для механики сплошной среды единственной формы ее представления – формы дифференциальных уравнений. В отношении газовой динамики до сих пор в этом не сомневается не только рецензент. Но только он оскорбился на то, что автор осмелился сомневаться в непогрешимости выводов классиков. Но разве это его убеждение не есть своего рода собственный постулат? Разве кивки на своих авторитетных единоверцев могут разрешить чисто логическое столкновение предельно неравновесной газовой динамики с квазиравновесной термодинамикой? Но не имеет ли развернутый вокруг последних работ автора шабаш и вовсе не научный характер? Кстати, вот еще одно любопытное место текста прежней рецензии. Это последнее предложение раздела «Зачем все это нужно вычислительной газодинамике?»: «Но если имелось в виду это, то в 1999 г. (в преддверии XXI в.) я могу только порекомендовать прекратить разработку численной методики, погрешность которой столь велика, хотя в шестидесятых годах такая низкая точность и была приемлемой».

Из материала раздела 1 уже этой статьи можно заключить, что предметом темы и цели моей предыдущей работы мог быть поиск в самом общем виде альтернативной формы представления уравнений газовой динамки для последующего использования этой формы в разностной схеме методики «Медуза». Такого характера цели поиска я отнюдь не скрывал. Более того, я не скрывал и того, что мой взор обращен к методу Годунова, таящему надежду на избавление от главного недостатка этой методики – немонотонности, чрезмерной в сравнении с другими методиками. Как видно из этой работы, поиск оправдался. Однако в самой рецензируемой статье столь лобовая формулировка цели вряд ли была бы уместна и своевременна?

Таким образом, из раздела 1 следует, что рецензент в своем понимании газовой динамики и термодинамики продемонстрировал себя как абсолютный, но воинствующий дилетант.

3. Но как быть с энтропийным вопросом?

Из вышеизложенного, очевидно, следует, что традиционная экстраполяция на газовую динамику законов классической термодинамики в общем случае не может иметь чисто логической основы и, вообще говоря, заслуживает самостоятельного анализа. Только кому это теперь надо? Не более ли интересно само исторически устоявшееся толкование законов термодинамики, закрепившее за ними статус принадлежности «королеве физических наук», и то, как родились все те легенды, за которыми укрылись «многочисленные экспериментальные подтверждения» законов этой королевы? И что вообще скрывается за эквивалентностью нарушения закона неубывания энтропии вечному двигателю второго рода?

Когда речь об эквивалентности заходит в математике, то принято подразумевать некую теорему, доказательство которой требует независимого логического вывода двух вещей – необходимости и достаточности. А что скрывается за экстраполяцией подобной терминологии на формулировку физических законов? Разве законы термодинамики математические? Но где тогда соответствующее независимое доказательство необходимости и достаточности?

Легко согласиться с тем, что эта квазистатическая дисциплина, по определению сразу ориентированная на огромное число хаотически двигающихся частиц, имеет право на их интегральную характеристику в терминах понятия энтропии, но требование абсолютного ее локального неубывания на основании экспериментально подтверждаемого потока тепла в сторону меньшей температуры есть не более и не менее чем произвол. Далее, легко согласиться с тем, что обычный для термодинамики ее дифференциальный формализм вполне оправдывает качественный характер этой квазистатической дисциплины. Только о самой ее квазистатичности забывать никак не следует. Другими словами, из нее вовсе не следует, что основные уравнения математической физики всегда обязаны иметь форму дифференциального представления.

Живым примером возможности альтернативного представления уравнений газовой динамики и является эта случайно пробившаяся на уровень публикации статья.

Впрочем, для продолжения этого раздела логично далее воспроизвести из [6]:

«§ 44. Различные понимания второго начала термодинамики

Термин “второе начало термодинамики” употребляется в физике уже более ста лет. Однако до сих пор разные авторы вкладывают в него различное содержание. Хотя этот вопрос чисто терминологический, имеет смысл коротко остановиться на нем.

Наиболее логично поступают те авторы, которые понимают под вторым началом основной постулат: постулат Томсона–Планка, постулат Клаузиуса или эквивалентные им утверждения.

Другие авторы сводят содержимое второго начала термодинамики к двум положениям, являющимся следствиями основного постулата: 1) существованию энтропии S как функции состояния системы; 2) принципу возрастания энтропии. Эти два положения, как впервые отметила Т. А. Афанасьева-Эренфест (1876–1964), логически независимы друг от друга. В самом деле, существование функции S совершенно не зависит от необратимости естественных процессов, отраженной в формулировке основного постулата. Это видно уже из того, что в основу доказательства существования энтропии S можно было бы положить прямо противоположный постулат, например такой: "Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы нагревание теплового резервуара за счет механической работы". Доказательство же возрастания энтропии существенно опирается именно на основной постулат, а не на обратное ему утверждение. Если бы было справедливо обратное утверждение, то энтропия адиабатически изолированной системы не возрастала бы, а убывала.

Наконец, многие авторы по примеру Афанасьевой-Эренфест понимают под вторым началом термодинамики только одно следствие основного постулата, а именно существование энтропии как функции состояния системы. Основанием для такого понимания может служить замечание, что все соотношения, имеющие характер равенств, выводимые из второго начала термодинамики, используют лишь одно свойство энтропии – ее бесконечно малое приращение является полным дифференциалом».

Иначе говоря, сводя все динамические процессы к случаю динамического равновесия произвольно большого числа хаотически двигающихся частиц, термодинамика упрощает общую ситуацию вплоть до исключения фактора времени. Но в таком случае ссылка на многочисленные экспериментальные подтверждение ее выводов выливается в чистое словоблудие. Существенным оказывается, что это бесконечно малое приращение энтропии является полным дифференциалом. Не исключено, что именно это свойство и спровоцировало для термодинамики статус «королевы физических наук». Ибо бесконечно малые приращения как внутренней, так и внешней энергии, аналогично являясь полными дифференциалами, поколебать этот статус не в силах. В случае газодинамического процесса, хотя и делается вид, что те частные производные, которые имитируют зависимость этого процесса от времени, вполне корректно закрывают проблему времени, которая, как было показано выше, закрывается лишь с точностью до принципа дальнодействия. Итак, можно сделать окончательный вывод: замена классической модели методики «Медуза», несмотря на все препятствия ее улучшению со стороны рецензента, обоснована. Зная то, что соответствующая ее модификация требует лишь минимальных усилий, я просто недоумеваю, почему мои коллеги по методике, как новые, так и старые, вообще не желают знать этого обоснования? Не этого ли рецензент на деле и добивался?

4. Несколько слов об экспериментальном подтверждении физических теорий вообще

Будучи вынужденным по милости рецензента заниматься только поиском фактов обоснования своей правоты, я обратил внимание на две вещи: а) сам факт какого-либо различия понятий «математический» и «физический» сегодня в физико-математической литературе никак не оговаривается; б) ничего явно не говорится и о различии понятий «дальнодействие» и «близкодействие». Так, ни в теориях относительности, ни в квантовой механике, ни в ядерной физике и т. д. о *новом принципе* близкодействия ничего не известно. Тем не менее все они апеллируют к принципу экспериментального подтверждения. Между прочим, пробная попытка учесть этот *новый принцип* приводит к выводу того, что обе теории относительности могут быть только чисто математическими фантазиями, а экспериментальные подтверждения теорий Максвелла, квантовой механики и ядерной физики допускают альтернативные теории. Но раскрытие уже этих феноменов требует новых статей и усилий автора, которые, по-видимому, уже бесполезны.

Список литературы

1. *Рождественский, Б. Л.* Системы квазилинейных уравнений и их приложения к газовой динамике / Б. Л. Рождественский, Н. Н. Яненко. – М. : Наука, 1978.

2. *Годунов, С. К.* Численное решение многомерных задач газовой динамики / С. К. Годунов, А. В. Забродин, М. Я. Иванов, А. Н. Крайко, Г. П. Прокопов. – М. : Наука, 1976.

3. *Роуз, П.* Вычислительная гидродинамика. – М., Мир, 1980.

4. *Ландау, Л. Д.* Теоретическая физика : учеб. пособие / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – Т. VI: Гидродинамика. – М. : Наука, 1988.

5. *Годунов, С. К.* Элементы механики сплошной среды. – М. : Наука, 1978.

6. *Сивухин, Д. В*. Общий курс физики. Т. II: Термодинамика и молекулярная физика. – М. : Наука, 1975.