

К НАТУРФИЛОСОФИИ УДАРНЫХ ВОЛН

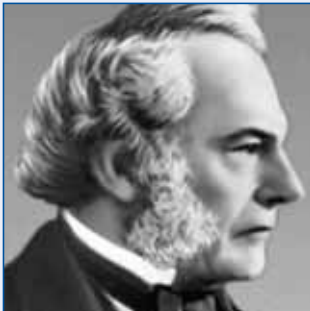
Валентин Анатольевич Белоконов, выпускник ФТФ МГУ/МФТИ, член Нац. Комитета теоретич. и прикл. механики, академик Академии космонавтики

физика ударных волн в газоподобных средах. Их взаимодействие со средой. Перспективы применения. The physics of shock waves in gaslike environments. Their interactions. Various application.

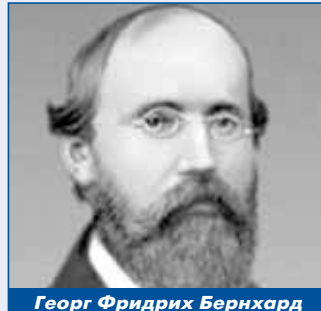
Ключевые слова: ударные волны, энтропия, информация, имплозия, тепловая смерть вселенной, необратимость.

Keywords: shock waves, entropy, information, implosion, heat death of the Universe, irreversibility.

Теория ударных волн создавалась такими классиками как Стокс (1848), Риманн (1860), Рэнкин (1870), Гюгонио (1887), барон Рэлея (1910), Тэйлор (1910, 1939), Буземанн (1928-1942), Гудерлей (1942), фон Нойманн (1942-1944), Осватич (1944), а также Л.И. Седов (1944-1946) и Мотт-Смит (1951). Детальная история этого восстановима по работам, приведенным в нашей хронологии.



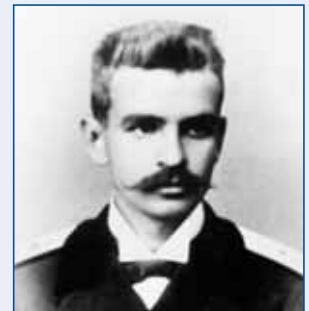
Джордж Габриель Стокс



Георг Фридрих Бернхард Риманн



Уильям Джон Макуорн Ренкин



Владимир Полиевктович Костенко

Для принципиального понимания фундаментальных термодинамических особенностей ударной волны - этого вечно актуального процесса - достаточно рассмотреть стационарный фронт ударной волны в средах, описываемых уравнением состояния совершенного газа, внутренняя энергия которого

$$E \equiv \rho / \rho (C_p / C_v - 1) \equiv \rho v / (\gamma - 1) \equiv (f/2) \rho v, \quad (1)$$

при $v \equiv 1/\rho$; $\gamma = C_p / C_v \equiv 1 + 2/f$, где f - число степеней свободы молекул среды в равнораспределительном приближении [Sommerfeld, 1949]. Для "перпендикулярно замагниченной" плазмы $\gamma = 2 = f$ [Альфвен, 1949].

Пусть течение сквозь локально-стационарный ударный фронт описывается невязкой ($Pr = 0$) эволюцией вдоль "прямой Рэлея" согласно эйлеровским уравнениям сохранения (при $\partial/\partial t \equiv 0$) потока массы, потока импульса и потока полной энергии. Конкретное выражение для начального состояния среды пока игнорируется:

$$\begin{aligned} \rho v &= \text{const}', \\ \rho + \rho v^2 &= \text{const}'', \\ E + \rho v + v^2/2 &= \text{const}''', \end{aligned} \quad (2)$$

откуда следует соотношение "ударной адиабаты" [Рэнкин 1870, Гюгонио 1887]:

$$\Delta E = -(1/2)(\rho_2 + \rho_1)\Delta v, \quad (3)$$

согласно которому даже бесконечно интенсивная "квазистационарная" ударная волна способна только к весьма ограниченному сжатию среды - **в отличие от волны "звуковой"**, сжимающей среду по закону изэнтропной адиабаты Пуассона или изотермы. Волны Пуассона любой амплитуды принципиально нестационарны в одномерном случае. Упоминанием нетривиальной аналогии между нестационарным одномерным и стационарным двумерным течениями [Буземанн 1929, 1940] пока ограничимся.

§1. Специфический эффект ограниченности ударного сжатия выводится простейшим способом из такой асимптотики адиабаты Рэнкина-Гюгонио:

$$E_2 \gg E_1, \text{ или } \rho_2 v_2 \gg \rho_1 v_1. \quad (4)$$

Для сжатия, по определению: $v_2 < v_1$, значит $\rho_2 \gg \rho_1$, т. е.

$$E_2 - E_1 = -(1/2)(\rho_2 + \rho_1)(v_2 - v_1) \Rightarrow -(1/2)\rho_2(v_2 - v_1) \quad (5)$$

на том, что здесь конкретный начальный вид функции $E_1(\rho, v)$ можно считать пренебрежимым, сказывается нечто фундаментальное: информация о доскачковом состоянии среды стирается в соответствии с ростом энтропии как меры дезинформации [Толмен, 1938], "вопреки" Теореме Лиувилля [Пуанкаре 1906/08].

Итак, даже бесконечно интенсивная ударная волна дает ограниченное **ударно-адиабатическое необратимое сжатие** среды $\{(1) \text{ и не только}\}$, поскольку в итоге получается совершенный газ:

$$\rho_2/\rho_1 \equiv v_1/v_2 \rightarrow (\gamma_2 + 1)/(\gamma_2 - 1) \equiv f_2 + 1. \quad (6)$$

Здесь подразумевается и случай изменения γ от γ_1 к γ_2 (например, от $\gamma_1 = 7/5$ для воздуха до $\gamma_2 = 5/3$ или $4/3$ для плазмы при достаточно сильных взрывах). Подобная асимптотика позволяет эмпирически определять "экстремальные" уравнения состояния сред.

Если $M_{sh} = f$, то практически неограниченное сжатие возможно последовательностью N скачков согласно формуле $\rho_N/\rho_1 = f^N$ для последовательности скачков одинаковой интенсивности, что оптимально [Осватич 1944; Линдл 1995/98, 2012; Шторм 2012].

Для любых амплитуд и структур фронта ударной волны справедлива классическая формула Гюгонио (где подразумевается, $\gamma = \gamma_1 = \gamma_2$)

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(\gamma-1) + (\gamma+1) \frac{P_2}{P_1}}{(\gamma+1) + (\gamma-1) \frac{P_2}{P_1}} = \frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)} \left[1 + \frac{2}{M_{sh}^2 (\gamma-1)} \right] \equiv \quad (7)$$

$$\equiv \frac{f+1}{1+f/M_{sh}^2}; \quad P_2/P_1 = (2\gamma M_{sh}^2 - \gamma + 1) / (\gamma + 1),$$

где число Маха ударного фронта $M_{sh} \equiv D/a_1 \equiv D\sqrt{(\rho_1/\gamma p_1)}$, а D - скорости распространения ударного фронта относительно невозмущенной



Джеффри Инграм Тейлор



Адольф Буземанн в 1935 г.



Леонид Иванович Седов

среды, где скорость звука a_1 . 50 % максимального сжатия достигается при $M_{sh} = \sqrt{f}$, а при $M_{sh} = f$ получается совпадение: $\rho_2/\rho_1 = f$ [Белоконь, 1953].

Пуассоновская **изоэнтропическая адиабата** соответствует **асимптотическому нестационарному беспредельному сжатию (обратимому!)**

$$\rho_2/\rho_1 \equiv (P_2/P_1)^{1/\gamma} \rightarrow \infty, \text{ при } P_2/P_1 \rightarrow \infty, \gamma \equiv \text{const} \quad (8)$$

Практически [Шторм 2012] комбинация упомянутых адиабат позволяет достигать плотностей $\approx 600-800 \text{ г/см}^3 (\approx 10^{11} \text{ атм.})$ DT - "начинки" капсул лазерного термояда.

§2. Фундаментальным фактором, ограничивающим ударно-волновое сжатие, является здесь возрастание энтропии во фронте ударной волны (**в итоге не зависящее от конкретного механизма диссипации и локальной неадиабатичности**).

Малоинтенсивная ударная волна слабо повышает энтропию S среды. При числе Маха фронта ударной волны $D/a_1 \equiv M_{shock}$, когда $M_{shock}^2 - 1 \equiv \varepsilon \ll 1$, имеем

$$\frac{S_2 - S_1}{C_v} \equiv \frac{1}{12} \left[1 - \frac{1}{\gamma^2} \right] \left[\frac{P_2}{P_1} - 1 \right]^3 = \frac{2}{3} \frac{\gamma(\gamma-1)}{(\gamma+1)^2} (M_{shock}^2 - 1)^3 \quad (9)$$

Даже столь малое возрастание энтропии принципиально в качестве фактора стирания информации о динамической предыстории формирования ударной волны, т.е. игнорирования ансамбля таких возможных предысторий. Уместно напомнить, что адиабатический рост энтропии подразумевает возрастание фазового объема рассматриваемой подсистемы: $\Delta G \equiv \exp S/k \rightarrow \rightarrow \equiv M_{sh}^2$ поскольку для высокоинтенсивной ударной волны [Oswatitsch, 1976]

$$(S_2 - S_1)/C_v \equiv \ln[1 + (M_{shock}^2 - 1)2\gamma(\gamma+1)] \rightarrow \approx 2 \ln M_{shock} \rightarrow \rightarrow, \quad (10)$$

что и делает такой процесс однократного сжатия малоэффективным.

Итак, здесь рост энтропии не только приводит к игнорированию специфики исходной среды, но и явно противоречит Великой Теореме Лиувилля. Данный парадокс был принципиально разрешен в начале XX-го в. публикациями Анри Пуанкаре, в первые предложившего отличать энтропию "мелкозернистую" от крупнозернистой, отображающей так называемое фазовое перемешивание.

Поскольку одномерная гидрогазодинамика описывается тождеством Гиббса в приближении локального термодинамического равновесия (\neq термостатике!), т.е. при мгновенной температурной релаксации

$$dE = TdS - pdv, \quad (11)$$

степень сжатия для сред $E = C_v T$ такова:

$$\rho_2/\rho_1 = (\rho_2/\rho_1)^{1/\gamma} \{ \exp[-\Delta S/C_p] \}, \quad (12)$$

откуда очевидна роль возрастания энтропии вообще и для свойств ударно-волнового адиабатического в итоге сжатия.

Следует уточнить, что в волне Пуассона $TdS \equiv 0$, а в структуре ударной волны (скажем - на уровне модели Навье-Стокса) $TdS > 0$ для втекания в ее структуру и $TdS < 0$ для вытекания при соблюдении в итоге $\Delta Q \equiv 0$.

§3. Подытоживая сказанное, имеем.

Ударная волна: только необратимое сжатие, но ограниченное; скорость - только сверхзвуковая; профиль - только монотонный, стационарный. Эта стационарность соблюдается при условии относительно малой толщины фронта ударной волны по сравнению с иными характерными протяженностями течения, хотя для достаточно слабой волны протяженность структуры ее фронта достаточно велика.

"Звуковая" волна: и сжатие, и разрежение - оба обратимые

и принципиально неограниченные; скорость - только звуковая; профиль - плавный, всегда нестационарный (разрывы - только второго рода) вплоть до превращения в ударную волну, аналогично возникновению цунами.

Среди неклассических уравнений состояния нелишне отметить $E = 2,7nkT$, и $S = 3,6kn$, где $n = \langle n_{phot} \rangle = = 20T^3 \text{ К}$ - это средняя плотность фотонов, что актуально для "экстремальных" технических процессов с доминирующим тепловым излучением, а также соответствует атмосферам некоторых звезд - ударным волнам "Сверхновых" и "Цефеид".

В работах астрофизиков упоминаются "бестолкновительные скачки", структура фронта которых остро дискретизируется. Производство энтропии этими скачками пока не столь ясно. В частности, здесь нет внятного понимания относительной роли разных диссипативных факторов, обеспечивающих соотношение Рэнкина-Гюгонио. Ограничимся упоминанием двух механизмов соответствующих ударно-волновой диссипации:

- фотонный перенос тепла [Белоконь ДАН, 1972];
- "ландауовское затухание" [школа Роальда Сагдеева с 1960-х годов].

§4. Создатели математических основ гидродинамического описания газовой динамики (Даламбер, Эйлер, Стокс, Риманн, Рэнкин, Рэлей) осознавали, что описываемая ими "сплошная среда" реально состоит из молекул, существование которых игнорируется гидродинамической сглаженностью. Без такой сглаженности аппарат математического анализа неприменим. Иными словами, они создали модель редуцированного континуального описания газодинамических течений, оказавшуюся удивительно продуктивной практически, несмотря на дезинформационное игнорирование молекулярного строения реальной гидрогазодинамической субстанции.

Правда, сглаженность гидродинамического (эйлерового) описания в этой континуальной модели оказалась необязательной из-за неизбежности "самоорганизации" разрывов: ударных волн. Иными словами, редуцированность эйлеровского описания, предполагавшего математически удобную "сплошную среду", обернулась парадоксальной потребностью **постулирования** разрывов первого рода, т.е. мгновенных переходов между состояниями континуальной "сплошной среды". Здесь - опять игнорирование релаксационных процессов, при утративании молекулярной информации. Математические трудности эйлеровского описания ударных волн вуалировались термином "обобщенное решение", а также - введением δ -функции Хэвисайда-Дирака.

Но развитие теоретической физики дает неожиданный повод считать гидродинамическое редуцированное континуальное описание не просто допустимой практически полезной удачной моделью.

Статистическая термодинамика Гиббса позволяет рассматривать континуальное эйлеровское описание как принципиально и фундаментально корректное. Иными словами, принципы статистической термодинамики уже сами по себе подразумева-

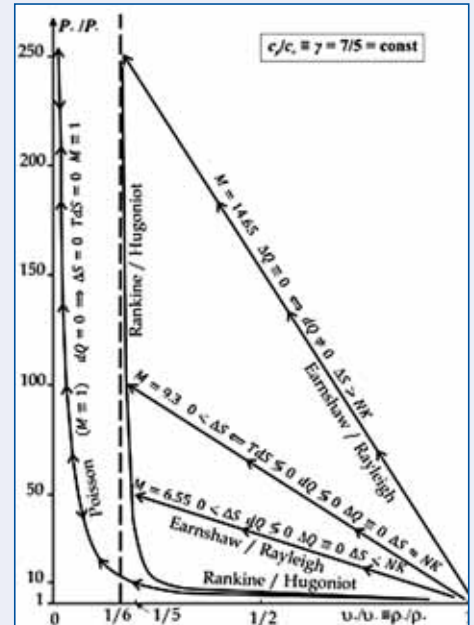


Рис. 1. Иллюстрация термодинамических различий между адиабатами. Принципиальное различие этих адиабат: в изэнтропической волне эволюция среды вписывается в адиабату Пуассона, происходя вдоль ее кривой; вдоль ударной адиабаты эволюция не идет, а происходит по PV плоскости - в данном случае по "прямой Рэлея" ($Pr = 0$).

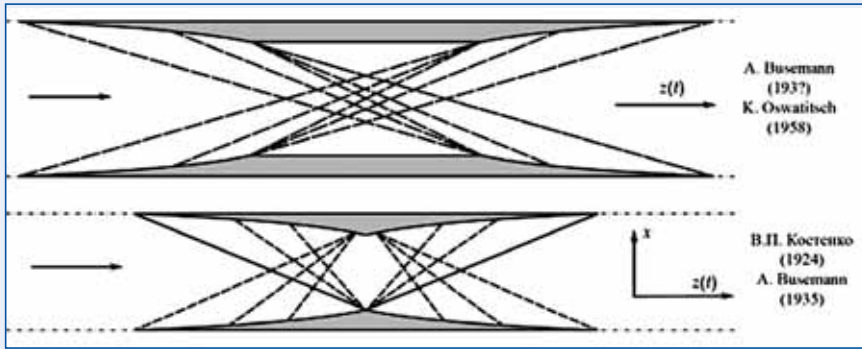


Рис. 2. Гиперзвуковой и умеренно сверхзвуковой бипланы Буземанна при фиксированных числах М.

К опровержению авторитетов - кромки профилей предельно остры. По этому поводу см. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц: МЕХАНИКА СПЛОШНЫХ СРЕД §113, Москва 1944, 1953/54 Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц: ГИДРОДИНАМИКА §122, Москва 1986

Согласно Ландау (§ 122) "Простые соображения показывают, что при обтекании произвольного тела сверхзвуковым потоком, перед телом непременно возникает ударная волна". Термин "непреренно" был убран Лифшицем после кончины Ландау - не без настояний автора данной статьи (лето 1984 г.), указывавшего на примеры течений, противоречащие этому классическому курсу, распространенного на европейских и азиатских языках. Поиск алогизмов "простых соображений Ландау" - полезное упражнение для студентов.

Совет преподавателю: дайте задание отыскать в дальнейших аргументах Ландау логический прокол, существование которого связано с последующим текстом автора.

Между тем, на конгрессе памяти Вольты (Рим 1935 г.) классик газодинамики Адольф Буземанн продемонстрировал конфигурацию из двух профилей крыла - "БИПЛАН БУЗЕМАННА" - сверхзвуковое обтекание которой не сопровождается возникновением "головной" ударной волны, а в приближении невязкой сжимаемой жидкости сверхзвуковое обтекание происходит совершенно безударно. Этот класс сверхзвуковых течений является своеобразным зазвучковым аналогом "парадокса Даламбера-Эйлера" (XVIII век)...

Кстати, в силу известной аналогии (пусть не вполне точной) между волнами на поверхности "мелкой" воды и волнами сверхзвуковых течений, можно ожидать соблюдения "парадокса Буземанна" для корректно сконструированного катамарана, волновое сопротивление которого ничтожно.

Однако, в 1924 г. в Петрограде издается книга "Теория корабля" В.П. Костенко, предположившего именно такой принцип минимизации волнового сопротивления кораблей - катамаранов и тримаранов, обводы их корпусов вызывают такую систему волн сжатия и разрежения, которая на воде дает минимизацию волнового сопротивления. А в газодинамическом аналоге - в эйлеровом приближении это дает полную ликвидацию волнового сопротивления - поскольку предотвращает формирование ударных волн.

На данной иллюстрации (где $C_p/C_v = 3$ ради простоты) в схеме Костенко-Буземанна сжатие происходит на центрированных простых волнах - либо в такой системе слабых скачков, которая является аналогом простой центрированной изэнтропической волны.

Между тем, согласно курсу теорфизики (1944, 1954, 1986 §110) Ландау-Лифшица, ударно-волновой аналог простой изэнтропической центрированной волны сжатия считается как бы противостественным, хотя уже с 1944 г. именно такой аналог стал известен, затем практически реализуется в качестве оптимального течения входных (intake) сверхзвуковых диффузоров ВРД - согласно работам классиков - Адольфа Буземанна, Клауса Осватича и Архипа Люльки.

ют истинность континуальности "сплошной среды". Эта континуальность превращается из гениального методического трюка в натурфилософскую сущность.

Статистико-термодинамическая категория энтропии корректно заменила слишком детальное описание среды, во многом сменив парадигму реальности кинетического описания. Точное вычисление энтропии основано на принципиальной неточности детально-механического описания. Модели того, что называют "сплошной средой", для слишком многих задач принципиально игнорируют "точное" молекулярное описание, которое в свою очередь уже обновлено квантовой механикой с ее волновой идеологией, тем более - с утверждением гайзенберговского "принципа неопределенности".

Итак, редуцированное континуальное описание не менее строго обосновано натурфилософски, чем "детальное" кинетическое, поскольку диагностика среды принципиально интерпретируется и предсказывается на основе статистической термодинамики, в которой точное вычисление энтропии и температуры, не говоря о массовой плотности, не нуждается в знании деталей на молекулярном уровне.

Недаром Хэвисайд повторял студентам: "Чтобы хорошо понять, я не нуждаюсь в знании механизма пищеварения".

§ 5. О красоте в натурфилософии и натурфилософии красоты

По мнению Бурбаки, математические открытия нередко приводят к формулам, которые как бы в результате предопределения вполне укладываются в аналитическое описание физических процессов. Пример этому - сопоставление "Треугольника Паскаля" с "Задачей Гюгонио" (Рис.4). Эта элементарная модель математической статистики приводит к формуле для абсолютно иных параметров и переменных, описывающей детерминированную механику реверберации ударных волн в совершенном газе. Назовите это, если угодно, мистикой.

Но разве не предпочтительнее рассматривать и иную категорию: натурфилософский принцип красоты.

Игнорируя формулировки (от Платона до Гайзенберга) "что такое красота", ограничимся тем, что называют "указательным определением".

ЭПИЛОГ (перспективная проблематика)

I. Строгой (не столь остроумно упрощенно-модельной как у Мотт-Смита) аналитической теории ударных волн пока нет. Значит, нет и достаточно глубокого понимания этого распространенного в Природе и актуального явления, которое характеризуется экстремально быстрым ростом энтропии среды. Здесь - слово за неравновесной статистической термодинамикой. Экспериментальный материал здесь обогащается и такими методами как лазерное сверхточное зондирование структур фронта ударной волны плюс прогресс в численном моделировании на суперкомпьютерах.

II. Ударные волны в плазме - от космической (в том числе внутризвездной) до лабораторной и "заводской" (термоядерные реакторы и специспытания) остаются во многом "белым пятном" теории. Яркий пример - пример "бесстолкновительных скачков", то есть поиск своеобразного эквивалента свободного пробега "обычных" молекул - но чего-то еще в той или иной плазме. Здесь пока приходится утешаться пионерскими работами таких умов как Сагдеев и Тайдман.

Ясно, что качество описания ударных волн связано с качеством теории плазмы. Здесь еще придется ожидать ясности, ограничиваясь вычислительным и натурным экспериментом, толкуя их интуитивно.

III. Естественным ожидаемым прогрессом явятся исследования релятивистских скачков, где успех принадлежит Джоржу Чеплайну (George Chapline, LLNL), не говоря о наших теоретиках Имшеннике и Морозове.

Здесь и проблемы обобщения нерелятивистских моделей, так и недостатки самой релятивистской термодинамики несмотря на попытки таких как Паули и Толмен, а также Мёллер.

IV. Ударные волны в специфически квантовых системах - от скачков при столкновении атомных ядер и иных элементарных частиц до ударно-волновых процессов в начальной стадии Большого Взрыва, а также при генерации гравитационных волн.

V. Изобретательское творчество: наступит и прикладной прогресс - вплоть до новейших направлений в двигателестроении.

Модели стационарной Вселенной, подразумеваемые космологическими сценариями Больцмана и Эйнштейна, основаны на гипотезе о вечности такой Вселенной. Но тогда максимум ее энтропии уже достигнут. Впрочем, такие суждения очевидно опровергаемы наблюдениями астрономов-современников Больц-

мана, не говоря об Эйнштейне. Таков был фундаментальный парадокс космологии до зарождения сценария расширяющейся Вселенной. Это оказалось связанным с возможной ролью астрофизических ударных волн.

В сентябре 1932 г. в Кэмбридже (Англия) на заседании Международного Астрономического Союза выступил Артур Эддингтон, выдвинувший еще в 1920 году идею термоядерного горения звезд. Вот фрагмент его речи: "Первый намек на модель расширяющейся Вселенной содержится в статье, опубликованной в ноябре 1917 года профессором де Ситтером (W. de Sitter). Релятивистская модель Вселенной была впервые опубликована Эйнштейном за два года до этого".

Более чем через 40 лет трижды Герой Соцтруда Я.Б. Зельдович в ГАИШе (МГУ) убеждал астрофизиков, что расширение Вселенной вполне могло начинаться из холодного ее состояния - вопреки модели Горячего Начала, проповедуемой Георгом Гамовым. Признаюсь, что я по достоинству оценил эту тираду одного из создателей нашего термоядерного оружия, поскольку для него Вселенная должна быть подобием водородной бомбы. Он считал, что именно таким образом энтропия Вселенной нарабатывается уже после начала ее расширения. По-моему, загадка энтропии окружающей нас Вселенной Зельдовичем так и не была раскрыта. Жду - возражат: первым автором убедительного сценария происхождения энтропии Вселенной следует считать того же Артура Эддингтона. Не хотелось бы

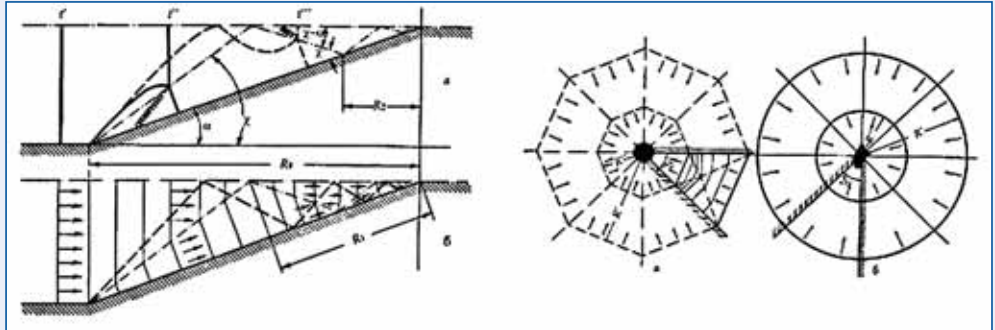


Рис. 3. Две разновидности имплозии ударной волны [ЖЭТФ № 1, 1965].

а - этапы:

f' - плоский невозмущенный ударный фронт;

f'' - после образования маховской ножки первого поколения, которая растет под углом и отраженной волны, присоединенной к углу (за невозмущенным фронтом течение сверхзвуковое в системе координат вершины угла);

f''' - после исчезновения первоначального фронта, когда $R > R_1$ и возникла маховская ножка второго поколения с системой отраженных волн (жирный пунктир). Спираль между тройной точкой и стенкой - контактный разрыв.

б - положение ударного фронта в последовательные времена. Тонкий штрих-пунктир - траектория тройной точки, жирный пунктир - система отраженных волн в момент достижения ударным фронтом вершины полости. Стрелки указывают направление распространения ударного фронта в различные времена.

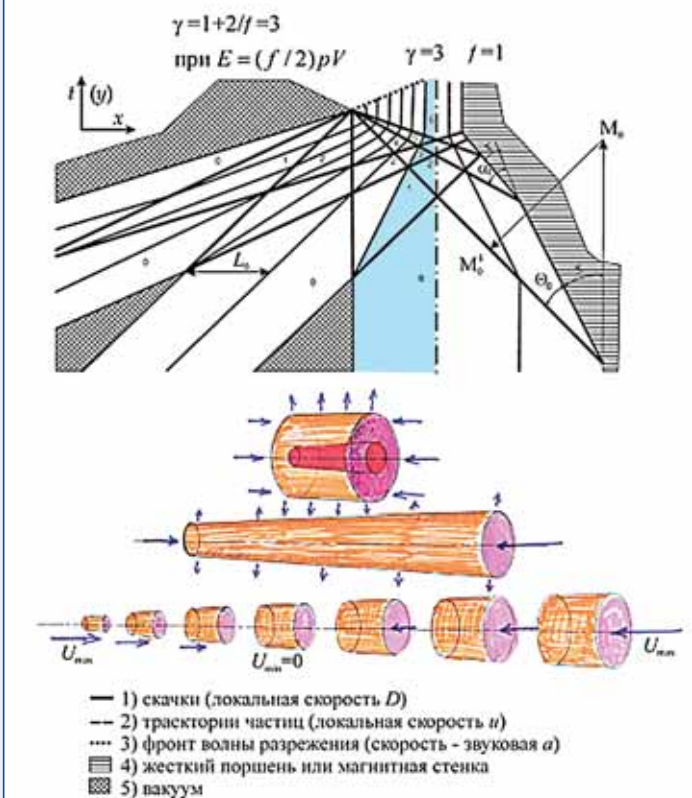
.....
Аналогия между круговым (Гудерлеевским) "схлопыванием" и вхождением в клиновидную полость (по Покровскому).

а - воображаемое всестороннее "схлопывание" многоугольного ударного фронта: возмущения не могут сильно нарушить симметрию процесса (черное пятно),

б - воображаемое вхождение в клиновидную полость: возмущения (роль которых символизирует пятном) могут сильно разрушить симметрию процесса, препятствуя достижению высокой скорости "схлопывания", т.е. очень высокой плотности энергии, но умеренно высокой плотности массы.

Обобщение задачи Гюгениот дает неизэнтропический аналог инвариантов Римана

© Валентин А. Белоконов, Москва, Россия 1973



скрыть от читателя, что в научной школе Ландау, к которой причислял себя и Зельдович, считалось изысканной шуткой называть Эддингтона "великим патологом". Между тем, на странице 25 книги "The Expanding Universe", изданной Эддингтоном в 1933 году, утверждается, что предельно большая скорость расширения Вселенной существовала с самого начала нашего нынешнего мироустройства: "Для теоретической полноты мы должны добавить гипотезу о возможности существования (до начала расширения) нашей Вселенной в состоянии коллапса (имплозии)... Это подразумевает большую скорость расширения как результат имплозии, за которой должен был бы следовать разлет материи. Насколько мне известно, такая модель не отстаивается никем".

В упомянутой задаче, моделируемые галактики группируются, соударяясь плашмя с генерированием реверберации ударных волн при стискивании каждого внутреннего слоя соседними. При таком сценарии событий наступает эра мощной генерации энтропии Вселенной с доминированием теплового излучения. И пози-

**Рис. 4. Упрощенная картина: вместо перспективного множества фрагментов термоядерной капсулы изображено всего лишь N = 7. Здесь $\gamma = 3$ или $f = 1$. Фрагменты (например, термоядерной капсулы) выстраиваются слева направо, где они сами стыкуются, сжимаются ударными волнами (результатирующий взрыв может происходить за кормой космического корабля). Такая схема принципиально удобна для инициирования ионами ускорителя или "ударным термоядом". Исходная величина продольного критерия $\langle \rho \rangle$, здесь слабо снижается, а поперечное значение $\langle \rho \rangle$ быстро возрастает. Здесь вакуум граничит с субстанцией, обладающей достаточными силами сцепления, пренебрежимыми после первой ударной волны. Число новых состояний $k = N - 1$. Максимальное сжатие составляет $\rho_k / \rho_0 = (k + f)! / k! f!$...
Разве не поразительно, что в точности такая же формула фигурирует в математической статистике (классическая задача "треугольника Паскаля"), а также в энтропии Больцмана.**

.....
Здесь строго соблюдается неизэнтропический аналог инвариантов Риманна: $u \pm fa = \text{const}$ (Riemann 1859); $u \pm fD = \text{const}$ (В.Белоконов 1973) по мере ослабления скачков асимптотика $u \pm fa$, если сжатие стремится к бесконечному.



Рис. 5. Проект гиперзвукового ЛА, разработанного согласно теории Буземанна [1978 D. Kuchemann]

ция Зельдовича почти неинтересна.

Кинематически это аналогично группировке электронного пучка в клистроне.

Абсолютно иное совпадение состоит в одинаковости формул - для максимального сжатия (здесь - галактической) материи $(f + k)!/f!k!$

- с классической формулой математической статистики: "Треугольник Паскаля", а также - в Больцмановской формуле энтропии.

В случае столкновения галактик $k =$ числу контактов между галактиками, равное числу галактик минус единица. f уже фигурировало в данной статье для уравнения состояния совершенного газа: $f \equiv 2E/pv$ равно числу степеней свободы молекулы среды.

Натурфилософское рассмотрение "сущности" ударной волны автор обосновывает следующими суждениями.

Пусть читатель сравнительно молод и достаточно любознателен. Тогда актуален следующий вопрос: насколько адекватно воспринимаются следующие фрагменты описания ударной волны.

В отличие от объектов, в которых рост энтропии приводит к некоему подобию тепловой смерти, ударная волна имеет то, что осмысленно считать стационарным механизмом "самоомолаживания".

Энергия ударной волны имеет внешний (в итоге - поршнеобразный) источник, но для ее самоорганизации и поддержания устойчивой стационарности требуется не только приток энергии как таковой. Необходима и достаточно высокая упорядоченность, что подразумевает низкоэнтропийность поступающей энергии. Это от-



Рис. 6. Эрвин Шрёдингер - один из основных классиков квантовой физики.

Рисунок известного историка науки и техники Александра Кривомазова.

части гарантируется сверхзвуковой скоростью распространения ударных волн, само существование которых иначе невозможно.

В полном, буквальном, очевидном соответствии со Вторым Началом термодинамики - чем интенсивнее ударная волна, тем сильнее такая волна уничтожает (стирает, но скорее перерабатывает) информацию об исходном состоянии среды, в которую волна проникает. Иначе говоря, среда проникает в ударную волну при соответствующем выборе системы координат.

Уместно задаться вопросом: не поддерживает ли ударная волна свою упорядоченную стационарность за счет впитывания упорядоченности исходного состояния окружающей среды по принципу "порядок переходит в порядок". При этом обработанная волной высокоэнтропийная среда отбрасывается.

Теперь, после некоторого обдумывания прочитанного, читателю рекомендуется заглянуть в этапную книгу Эрвина Шрёдингера "What is Life?". В этом 100-страничном произведении, которое студенты ФТФ МГУ нашего потока считали чем-то вроде карманной Библии, имеются параграфы 57, 59, 60, 66. Здесь Шрёдингер знакомит с проблемой, которая известна как "Минимум сложности возникновения жизни". Шрёдингер объявляет необходимым следующий критерий: *живое питается отрицательной энтропией*. В ходу также термин "негаэнтропия". Ударная волна может трактоваться как псевдоживое entity, питающееся отрицательной энтропией, поскольку информация (по Бриллюэну) трактуется как отрицательная энтропия. Кстати, сам Шрёдингер уточнял, что "живое питается свободной энергией", величина которой явно зависит от отрицательной энтропии: $F \equiv E - TS$, где $E =$ внутренней тепловой энергии. Но для ударной волны здесь не хватает кинетической энергии окружающей среды...

На уровне натурфилософской "Минимальной сложности возникновения жизни" интересен следующий тезис: в природе действуют предпосылки возникновения жизни. Такое можно усмотреть в радикальной "Теории монад" Лейбница.

Благодаря формированию ударных волн, сопротивление тел на сверхзвуке ниже, чем при изэнтропическом обтекании: ударная волна работает как своеобразный двигатель.

Далее, сочетание свойств грозового разряда с сопутствующей ударной волной приводит к самоорганизации фантастического объекта - шаровой молнии. Таковую вблизи наблюдал автор данной статьи, осмелившийся через 35 лет высказаться, что шаровая молния - первая попытка природы создать сознательный организм.

Считаю приятным долгом выразить благодарность за неформальный интерес к данной работе Т.В. Баженовой, В.А. Битюрину, Л.С. Гвоздевой, Б.И. Каторгину, Р.И. Нигматулину, А.И. Климову, О.В. Руденко, А.А. Рухадзе, Л.Е. Стернину, В.А. Фокееву. В особенности - А.Т. Фоменко и В.М. Чепкину.

Весьма ценна и техническая помощь Татьяны Руденко. **П**

Селективная хронология исследований ударных волн

1870 W. Rankine: Trans. Roy. Soc. CLX, Part II, p. 277. "On the Thermodynamic Theory of Waves of Finite Longitudinal Disturbance".
 1875 Ernst Mach: Discovery of irregular Shock Reflection [Мизес 1958].
 1887/89 H. Hugoniot: J. Ecole Polytech. Vol. 58, 1-125.
 1902 W. Gibbs: Elementary principles of statistical mechanics, YAEUniv
 1906 Henri Poincare: Journ. Phys. theor. appl., 4 ser. 5, 369. Перевод в т. III избранных трудов, М.: "Наука", 1974.
 1910 Baron Rayleigh: Proc. Royal Soc. A, vol. LXXXIV, pp. 247...284. "Aerial plane waves of finite amplitude".
 1920 Arthur Eddington: Nature (Гипотеза о термоядерном горении звезд)
 1922 R. Becker: Zeitschr. Physik, b. 8, s. 321.
 1924 В.П. Костенко: "Теория корабля", Красный Морфлот, Петроград (катамаран - прототип Биллана Буземанна).
 1925 E. Borel: Mecanique statistique classique. Paris.
 1926 A.S. Eddington: "Internal constitution on stars", Cambridge.
 1928/29 Adolf Busemann: ZAMM b. 9, n. 6 (стреловидное крыло, точная теория скачков на клине, конусе и их неоднозначность).
 1933 Arthur Eddington: "Expanding Universe", Cambridge.

1935 Arthur Eddington: *New Pathways in Science*, Cambridge.

1935/72 A. Busemann: доклад на Конгрессе памяти Вольты, Рим. (в т.ч. "Биплан Буземанна").

1938 R. Tolman: "The Principles of Statistical Mechanics", Oxford.

1939/41 G. Taylor: "The formation of a blast wave by a very intense explosion", Brit. Min. Home Secur. Report. (множественно переиздан).

1940 A. Busemann: Автомодельное решение сильного взрыва, вызываемого расширением сферического или цилиндрического поршня. *Schriften Dtsch Acad. Lufo.* n 1032 и в юбилейном сборнике в честь 60-летия Седова.

1941 A. Eddington: "On the cause of Cepheid Pulsation", *MNRAS.* Vol.101, p. 182.

1942 A. Busemann: *Luftfahrtforschung*, b. 19, s. 137.

1942 G. Guderley: *Luftfahrtforschung*, b. 19, s. 302.

1942 T. Cowling: *Phil. Mag.* Vol. 33, n 61.

1943 A. Weise, S. Chandrasekhar, J. von Neumann (теории Маховского отражения - ссылки у Куранта - Фридрихса, 1948).

1944 Erwin Schrodinger (1887-1961): *What is Life?* Cambridge 1945/56.

1944/57 Erwin Schrodinger: *Statistical Thermodynamics.* Cambridge.

1944 K. Oswatitsch (Wien): оптимизация входной системы скачков для ВРД, см. Hermann (1956).

1944/48 R. Courant, K. Friedrichs: "Supersonic Flow and Shock Waves", NY 1948, Springer 1956.

1944/49 Hermann Weyl: "Shock waves in arbitrary fluids". Report reprinted in *Comm. Pure and Applied Math.* Vol. 2, s. 103...122.

1944/86 Л. Ландау, Е. Лифшиц: *Гидродинамика (курс Теоретической физики).* Москва, все четыре издания (1944, 1951, 1954, 1986).

1946 R. Tolman, X. Fine: "Shock Wave". *Rev. Mod. Phys.*

1946 R. Sacks: On radiative shock wave. *Phys. Ref. Vol. 69*, p. 514.

1946/51 R. Sauer: "Ecoulements des Fluids Compressibles", Paris (Москва, ИЛ, 1954).

1947/49 Арнольд Зоммерфельд: Лекции по теоретической физике, Leipzig Univ. ("Термодинамика и статистическая физика", Москва, 1952; "Механика деформируемых сред", Москва, 1954).

1948 R. Tolman, P. Fine: Irreversible Generation of Entropy. *Rev. Mod. Phys.* v 20 p 51.

1948 R. Courant, K. Friedrichs: *Supersonic Flow and Shock Waves*, "Interscience" 1948, Springer 1956, Москва ИЛ, 1950 (русский перевод А.С. Компанейца).

1949 H. Alfven & J. von Neumann: in "Problems of Cosmical Aerodynamics", Dutton (US) 1951; (сокращ. русский перевод, Москва ИЛ, 1953).

1949 P. Jordan: *Philos. of Sci.* v 16, p 269.

1950 Erwin Schrodinger: *Proc. Royal Irish Academy.* v 53 A, p 189.

1951 H.M. Mott-Smith: *Phys. Rev.* Vol. 82, p 885...892.

1953 Leon Brillouin: *J. Appl. Phys.* v 24, p 1152

1954 С.П. Дьяков: ЖЭТФ. Т. 27, № 3.

1954 В. Белоконов: доклад на научной студенческой конференции (труды МФТИ, 1958)

1956 В.А. Прокофьев: О Структуре ударной волны в излучающей газе, Ученые Записки МГУ "механика". Вып. 172, с 79. Усугубление ошибки Рэнкина [1870, Рэйли 1910].

1956 R. Hermann: "Supersonic Inlet Diffusers", Minneapolis; Москва, ФМ 1960. Детализация идей Осватича - 1944.

1956 C. Evans, F. Evans: *J. Flu. Mech.* Vol. 1, n 1, p. 4.

1956 В.А. Белоконов: "Природа", АН СССР № 12. Ударные трубы для астрофизики.

1957 H. Liepmann, A. Roshko: *Elements of Gasdynamics*, NY-L, Wiley (Москва ИЛ 1960).

1957 Г. Голицын, К. Станюкович: ЖЭТФ. № 12 (изомагнитный скачок)

1957/62 Leon Brillouin: *Science and Information Theory*, Acad. Press, NY.

1958 R. Marshak: *Ph. Flu.* Vol. 1. n1, p. 24 jan./febr.

1958 R. von Mises: "Mathematical Theory of Compressible Fluid Flow", NY; Москва ИЛ 1961.

1958/59 В. Белоконов: Труды МФТИ, вып. 1 / ЖЭТФ. Т. 36, с 341.

1959 В.А. Белоконов: Сообщение на семинаре К.Е. Губкина (сектор физики взрыва ИХФ АН СССР): идея вывода о "существовании" скачка (фронта ударной волны), исходя из усреднения по "перехлесту" опрокидывающейся изэнтропической волны сжатия. Доклад был повторен на Всесоюзном Совещании по МГД [Латвия, Рига, 1962].

1959/60 J.H. Nuckolls: paper on the laserless impact microfusion, LLL California. Declassified by 1999.

1960/61 Ф.Л. Черноушко: ПММ. Т. 24. в 5/т25 в 2

1960/62 В.А. Белоконов: Доклады на МГД, - конференции, Рига.

1961 Л.П. Кудрин: ЖЭТФ. Т. 40, с. 1134.

1961 В.А. Белоконов: Тезисы докладов Советской Гравитационной конференции, МГУ.

1962 Leon Brillouin: *Science and Information Theory.* NY 2nd Ed. (1st 1956).

1962 The effects of atomic WEAPONS, NY-Toronto-London.

1962/82 R. Kidder: LLNL ICF papers.

1962 В.А. Белоконов: Труды МФТИ, Оборонгиз, Москва.

1962 В.С. Имшенник: ЖЭТФ. Т. 42, с. 236.

1963 К.В. Брушлинский, Я.М. Каждан: Об автомодельных решениях..., УМН. Т. 18, n. 2.

1964 Max Born: *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford.

1964 В.А. Белоконов: Обобщенная оценка ширины ударного фронта, ПМТФ, Новосибирск.

1965 В.А. Белоконов, А. Петрухин, В. Проскураков.: ЖЭТФ № 1 (Многогольная импlosion маховских отражений).

1966 R. Sauer: *Nicht stationers Probleme der Gasdynamik*, Berlin/NY. Москва, 1969.

1967 В.А. Белоконов: Задачи термодинамики ударных волн, ОПМ АН СССР, препринт и диссертация.

1968 В.А. Белоконов: Конгресс по механике, МГУ (опубл. в 1972 г., ДАН).

1969 R. Gross: "School of Enrico Fermi", course XLVIII, Varenna, AP NY-London, 1971.

1969 Сборник "Materials under unusual conditions", NY-L, Wiley.

1970 К.Е. Губкин в сб. "Механика в СССР за 50 лет"



Рис. 6. Адольф Буземанн, 1955 .
 После изобретения стреловидного крыла в 1929 г подтолкнул своего аспиранта Гудерлея к открытой публикации в начале 40-х годов ключевой работы по импlosionи ударной волны, что помогло американцам создать плутониевую бомбу. К концу войны был главным помощником Вернера фон Брауна по гиперзвуковой аэродинамике.
 В преклонном возрасте запатентовал теплозащитные плитки для Шаттла.



Рис. 7. Нильс Бор и его ученик Лев Ландау на празднике "День Архимеда" на физфаке МГУ в 1961 году.

Будучи не в силах представить себе фантастический размах Советского "атомного шпионажа", Нильс Бор наивно видел в Ландау главу нашего проекта "А-бомбы".

Хотя определённый вклад Ландау в ядерный проект имел место.

В свою очередь Ландау оказался... учителем Эдварда Теллера. Именно с Теллером Ландау пишет свою первую статью о структуре ударных волн.

1970 Л.И. Седов: Механика сплошных сред, т. 1.
 1970 В.П. Коробейников: Задачи точечного взрыва. Труды МИАН им. Стеклова.
 1970/73 J.G. Linhart: Nuclear Fusion. Vol. 10, n. 3; Vol. 13, n. 3.
 1971 Werner Heisenberg: "PHYSICS AND BEYOND", NY-London.
 1971 D. Tidman, N. Krall: "Shock waves in collisionless plasmas", NY-London, Wiley.
 Изложение работ П.З. Кордеева.
 1972 Y. Liepman, Erik Storm et al: J. Fluid Mech. (Имплозия скачка в конической полости).
 1972 Adolf Busemann: Ann. Rev. Fluid Mech., Cambridge.
 1972 В.А. Белоконов: Доклады АН СССР. Т. 202, № 6, с. 1296. (Английский перевод APHS некорректен!)

1972/76 J.H. Nuckolls et al: papers on ICF. LLN California.
 1973/75 В.А. Белоконов: Доклады АН СССР. Т. 222, № 3, с. 575.
 1974 G. Whitham: "Linear and Nonlinear Waves", NY-London. Рус. перевод Москва, 1976.
 1976 K. Oswatitsch: Grundlagen der Gasdynamik, Wien.
 1976 T.A. Weaver: The structure of supernova shock wave, Astrophys. J. Suppl., October.
 1976 G. Chapline et al: LLNL papers on the relativistic structure of radiative shocks.
 1976 Bazhenova T.V., Fokeev V.P., Gvozdeva L.G.: On various forms of Mach reflection and its transition to regular reflection. // Acta Astron.



Рис. 8. Комикс художницы Габриэль, популярно объясняющий принцип формирования "Отступающей ударной волны", приводящей к остановке потока субстанции. Это - презент автору статьи профессора Рихарда Куранта (Richard Courant), ученика великого немецкого математика Дэвида Гильберта (лето 1969 г., Москва, ВЦ АН СССР)

Vol. 3, № 1/2.
 1976 В. Белоконов, Ю.Ильинский, Р. Хохлов: "Лазерный синтез элементов", Письма в ЖЭТФ. 20 ноября.
 1977 В.А. Белоконов: Лазерный термояд - новый этап. УФН №. 500.
 1977 В.А. Белоконов, О.В. Руденко, Р.В. Хохлов: Акустический журнал АН СССР, август.
 1978 Препринт № 39: Часть I. (В. Белоконов, А. Забродин, А. Свалов, Я. Каждан, Р. Хохлов); Часть II. (В. Белоконов). ОПМ АН СССР.
 1978 D. Kuchemann "Aerodynamic design of aircraft", London
 1978 V.A. Belokogne: pap. Conf. ENERGY, Italy (Plenum Press NY, 1983).
 1978 И.Е. Забабахин, В.А. Симоненко: ПММ т. 42, в. 3.
 1980 В.С. Имшенник: Кумуляция ударных волн..., ПМТФ. п. 6, 10-19.
 1982 А. Свалов: Примеры точных решений сферического сжатия. Известия АН, МЖГ № 6, 176-179.
 1983 В. Белоконов: Доклады АН СССР, № 1.
 1984 Н. Климишин: Ударные волны в оболочках звезд, Москва, ФМ.
 1985 Lecture notes in physics - N 255: RADIATION HYDRODYNAMIC in stars and compact object; s. Woosley, T. Weaver v 91-120. C. Fransson. p. 141...165
 1985 Т. Баженова, Л. Гвоздева, В. Фокеев: Нестационарное взаимодействие ударных и детонационных волн, М. "Наука".
 1985 В.А. Белоконов: Всесоюзная конф. "Взрыв и детонация", Таллинн.
 1985 A. Hewish et al: Strong interplanet. shocks. NATURE, March 11.
 1986 А. Куликовский: Нелинейные волны в упругих средах. МИАН.
 1988 Е. Забабахин, И. Забабахин: "Кумуляция и ее границы", Москва: "Наука".
 1988 W. Broud: NY TIMES, March 31 (Zenturion/Halite LLNL, LANL Program).
 1989 Н. Кузнецов: УФН. Т. 159, № 3.
 1989 В. Ляхов, В. Титаренко, В. Поддубный: Воздействие ударных волн и струй..., Москва: Машиностроение.
 1989 Т. Aki, F.A. Higashino: "Numerical study on implosion of polygonal interacting shocks and consecutive explosion in a box". Current Topics in Shock Waves. 17th Intern. Symposium on Shock Waves and Shock Tubes, 1989, AIP Conference Proceedings 208, N.Y., 1990.
 1989 В.А. Белоконов: "Генерирование гравитационных волн течениями ультравысокого сжатия" в Сборнике "Экспериментальные тесты теории гравитации". Изд. МГУ.
 1990 L. Prandtl, K. Oswatitsch, R. Wiegart: Fuhrerdurch die Stromungslehre.
 1990 Hans Bethe: On Supernova, Rev. Modern phys. 62. Pp. 801...66.
 1991 В.Гусев О биплане Буземана. Уч. записки. ЦАГИ
 1995 О.В. Руденко: О пилообразных ударных волнах и затухании информации с дальностью распространения N-волн. УФН.
 1995 R. Rouds: "Dark Sun", NY-London.
 1995 Герман Смирнов: Владимир Полиевктович Костенко 1881-1956. М. "Наука".
 1995 D. Young, E. Corey: Global EOS for the hot dense matter. J. Appl. Phys. Vol. 78, 3748.
 1995/98 J. Lindl: "Inertial Confinement Fusion", Springer, NY-Berlin. Полезное изобилие ссылок.
 1996 A. Caruso, V. Pais: New impact fusion, Nucl. Fus. Vol. 36, № 6.
 1997 Т. Баженова, Л. Гвоздева и др.: Ударные волны в реальных газах, Москва.
 2000 Bill Gunston: Russian Aircraft, Oxford. (В т.ч. - роль А. Люльки)
 2000 S. Bouquet et al.: On radiative shock, Astroph. J. suppl., April.
 2001 Valentine A. Belokogne: "The Radiative Substructure in the Intense Shocks", (and refs in it) 3 Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, Moscow, April 2001, Proceedings, IVTAN, Moscow.
 2002 N. Apazidis et al: "An experimental and theoretical study of converging polygonal shock waves". Shock Waves 12: 39-58.
 2002 Valentine A. Belokogne: "Slamming... Book" (Multiimpact Fusion) Principle of Plasma Supercompression for the Space Propulsion // In: 4th Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics for Aerospace Applications, Moscow, Russia, 9-11 April, 2002, pp. 369...376.
 2004 А. Конюхов, А. Лихачев, А. Опарин, С. Анисимов, В. Фортвов: ЖЭТФ. Т. 25, № 4.
 2004 В.Я. Нейланд и др.: Асимптотическая теория сверхзвуковых течений вязкого газа. М., ФМ.

2005 V.A. Belokogne: Assessment of fusion powered flying machine, XV Intern. Moscow. Conf. MHD Energy conversion. Proceed. V. 3.

2005 М. Баско, С. Гуськов и др.: (в сборнике "Ядерный синтез с инерционным удержанием"), М. ФМ.

2006 R. Paul Drake: High-energy-density physics. Springer.

2007 V.A. Belokogne: Intern. Workshop Magn. Plasma Aerodynamics, Moscow, ИИТ (ИВТ) RAS.

2008 Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер: Физика ударных волн и высокотемпературных явлений, ФМ Лит. (3-е издание).

2008 Galen Gisler: Tsunami simulations, Ann. Rev. Fluid Mech. Vol. 40, Cambridge U.P.

2008 В.А. Белоконы: доклады на Третьей школе-семинаре по магнитоплазменной аэродинамике, ИВТАН.

2009 В.А. Белоконы: "Волны катмарана Костенко как прототип...", 6-ой Международный Аэрокосмический конгресс (август, МГУ), тезисы с. 308...309.

2009 Б.Каторгин, Л. Стернин и др.: Прикладная газовая динамика, МАИ.

2010 А.Н. Крайко: Теоретич. газ. динамика - классика и современность, Москва, ТОРУС.

2011 V.A. Belokogne: 10 International Workshop on Plasma Aerodynamics, Moscow, March, 2001, Proceedings, ИИТ (ИВТРАН).

2011 К. Хищенко, В. Фортов, А. Чарахчян и др.: о кумуляции ударной волны в конической полости, заполненной малоплотной (пористой) средой, JAppl. Phys. v.110, № 5.

2011 А.Н. Крайко: ПММ (РАН), № 5.

2011 Ю.П. Райзер: Введение в гидрогазодинамику и теорию ударных волн для физиков, Долгопрудный (МФТИ).

2011 John Lindl: Conference LLNL paper on NIF/NIC Program.

2012 Erik Storm: Warsaw Conf. on ICF, September.

2012/13 Л.Г. Воздева, С. Гавренков: ЖТФ (Письма) т. 38, в. 12./ ЖТФ т. 83, в.8.

2013 S.Presse, at all: Principles of maximum entropy..., Rev. Mod. Physiks. Vol.85 p 1115 (July - September)

2013 М. Perlin, W. Choi, Z. Tian: Breaking Waves..., Ann. Rev. Fluid Mech. V. 45.

2013 В.А. Белоконы: Стендовый доклад на конференции 11 WSMPA, ОИВТ РАН, Москва.

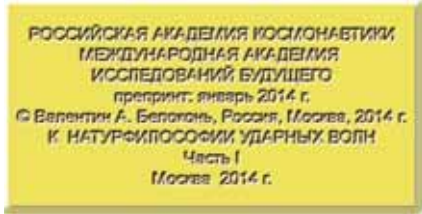
2013 Р.И. Нигматулин: Механика сплошных сред, МГУ. в т.ч. Введение в "Нанотермоид".

2013 В.С. Имшенник и др.: УФН, (апрель). Неадекватная категоричность критики "Нанотермоида".

2013/14 С. Блинников, А. Толстов и др.: Цикл работ о всышках "Гипер-сверхновых" излучающих до 10^{38} ватт

2014 В.А. Белоконы: Инженерная физика (ИОРАН), № 1, № 4.

2014 А. Крайко, Н. Тилляева: ПМТФ № 2.



Связь с автором: +74994453881



Рис. 9. Утопianская схема авиаконструктора Роберта ди Бартини: 200-метровый (при ширине 100 и наибольшей толщине примерно 5 метров) 100 000-тонный сверхзвуковой безударный экраноплан (1944 г.) для 2030-2050 гг., аналог биплана Буземанна. Взамен ГПВРД возможен индукционный двигатель. Не исключён и "марсианский вариант" применения. Профиль такого экраноплана регулируется под его скорость: подобно крылу "Дженерал Дайнемикс F-111". Нижняя прецизионная плоскость являет собой жёлоб или тоннель примерно 10 000 - километровой протяжённости .