

УДК 536.24.01

ВЛИЯНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ В ГАЗАХ В СИСТЕМАХ С ГРАДИЕНТОМ ДАВЛЕНИЯ

Я.Д.Белявский

PG Wave LTD, Израиль

Объединим термином “*волна звукового типа*” упругие волны, распространяющиеся со скоростью звука, независимо от частоты колебаний источника волны (звук, ультразвук, инфразвук). Тогда можно сказать, что **в газах** существуют только два типа упругих волн: *волна звукового типа и ударная волна*.

Ударные волны (УВ) распространяются со сверхзвуковой скоростью. Их появление связано с появлением новой массы (взрыв) или со сверхзвуковым движением. Ударная волна переносит энергию, это всегда волна сжатия. По мере продвижения энергия и скорость УВ снижаются и, когда скорость УВ становится равной скорости звука, она преобразуется в волну звукового типа.

Накопилось большое число наблюдений о влиянии звука на температурные процессы в газах: на нагревание [1], сушку [2], охлаждение [3]. Общими характеристиками этих процессов является то, что процессы происходят в газах и имеют резонансный характер, то есть наблюдается зависимость интенсивности процесса от частоты звука. К этому же классу явлений следует отнести температурные эффекты Ранка (Вихревые Трубы) [4] и Гартмана - Шпренгера [5]. Температурная сепарация в этих устройствах всегда сопровождается громким звуком.

Дополнительным общим свойством этих устройств является наличие градиента давления. Причём область нагрева находится в зоне повышенного давления, а область охлаждения в зоне сниженного давления.

Закрутка газа в вихревых трубах создаёт градиент давления с максимумом давления на периферии у цилиндрической стенки и минимумом в центральной области возле оси трубки. В трубках Гартмана - Шпренгера (ТГШ) градиент давления создаётся за счёт торможения газовой струи. Дно полости, установленной напротив сопла, разогревается до значительных температур, в этом месте давление максимально (кинетическая энергия струи переходит в потенциальную). В экспериментах [6] с использованием гелиевой струи на дне полости была достигнута температура ~1000°C. Область минимального давления — это зона между соплом и полостью, где скорость струи максимальна. Отводя тепло от наружной стенки полости, и выводя газ из пространства между соплом и полостью, добиваются значительного снижения температуры выходящего газа.

Для объяснения температурного разделения в этих устройствах выдвигались различные концепции. В качестве источника охлаждения газа в этих устройствах рассматривались адиабатное снижение давления при разгоне струй в соплах. Нагрев обуславливался вязким трением струй газа, рассматривались также микро холодильные процессы (или взаимодействие вихрей), в результате которых образовывались холодные и горячие микрообъёмы, которые затем разделялись. Нагревание в эффекте Гартмана – Шпренгера) объяснялось **ударными волнами**.

Однако до настоящего времени отсутствовали теории, адекватно описывающие эти температурные процессы. Временное отсутствие понимания физической основы этих процессов вынуждало нас относить их к области экспериментальных парадоксов.

Концепция упругих Волн Градиента Давления

Нами были выполнены экспериментальные исследования температурного разделения в устройствах, упомянутых выше, а также в короткой вихревой камере. Результаты экспериментов подтвердили вывод о том, что ранее существовавшие теории не могут объяснить температурное разделение в газах. Нами представлена и обоснована концепция упругих Волн Градиента Давления (ВГД) (Pressure Gradient Elastic Wave) [7 - 11].

ВГД это волны звукового типа. ВГД распространяются со скоростью звука в соответствии с принципом Гюйгенса-Френеля, эти волны интерферируют, отражаются, поглощаются. Однако ВГД отличаются от других волн звукового типа природой сил, которые создают стартовые флуктуации плотности, и направлением распространения. ВГД возникают в объёме (пространстве) при одновременном выполнении трех условий: объём заполняет сжимаемая среда (газ); в этом объём существует градиент давления; и в объёме генерируются флуктуации плотности (звуковые или турбулентные).

Обоснование существования ВГД не требует введения новых физических сущностей и основывается на классической термодинамике. С учётом того, что явление относится к неравновесной термодинамике (системы с градиентом давления).

Наиболее простой способ обосновать существование ВГД – это аналогия с известным явлением естественной (вынужденной) конвекции. Рассмотрим мысленный эксперимент, рис.1.

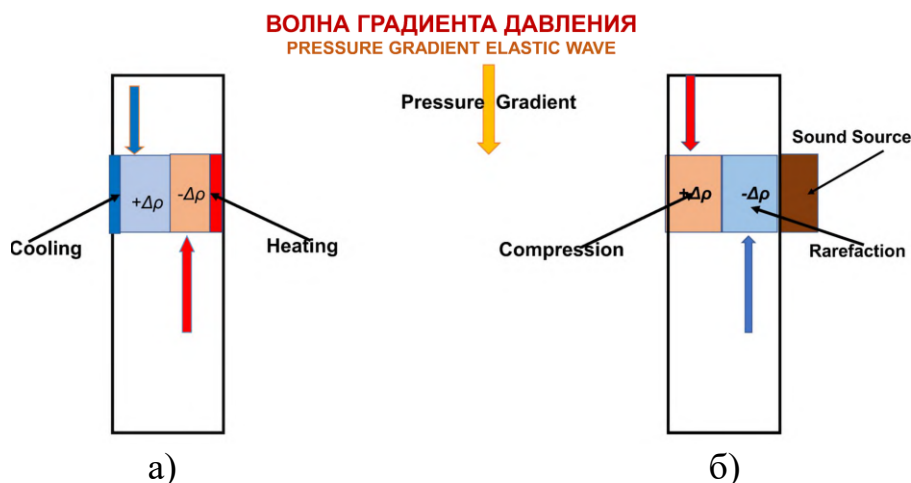


Рис. 1. Удлиненный объём, заполненный газом, в присутствии градиента давления.

На рис. 1 – два удлиненных объёма, заполненных газом, находящиеся в силовом поле, создающем градиента давления (гравитация, вращение...). Вектор градиента давления направлен сверху вниз в сторону увеличения давления. На рис.1а) на стенке объёма установлены пластины, которые создают в прилегающем пространстве нагретый и охлажденный микрообъёмы. Теория конвекции рассматривает баланс сил, действующих на границы микрообъёма по закону Архимеда. Результирующая сила давления, смещающая микрообъём, возникнет, когда плотность газа внутри микрообъёма будет отличаться от плотности окружающего газа. Очевидно, холодный микрообъём (более высокой плотности) будет, смещаться в сторону увеличения давления (вниз), а нагретый (более низкой плотности) - в противоположном направлении.

На рис.1б) на стенке объёма установлен источник звука, который создал звуковую флуктуацию плотности с образованием смежных зон сжатия и разрежения. Акустические процессы изучаются в рамках классической термодинамики, поэтому мы можем обоснованно рассматривать баланс сил давления, действующих на границы этих зон (так же как в явлении конвекции). По закону Архимеда, результирующие силы, действующие на зоны сжатия и

разрежения звуковой волны, не равны нулю, так как плотности в этих зонах сместились от равновесных значений. Эти силы направлены вдоль вектора градиента давления. На зону сжатия сила действует в направлении увеличения давления, а на зону разрежения - в противоположном направлении - в сторону уменьшения давления. Важным отличием от рассмотренного выше явления конвекции является адиабатический характер звуковых процессов. Поэтому зона сжатия в газе нагрета, а зона разрежения охлаждена.

Давление в газах определяется средней скоростью молекул, которая выше скорости звука. Звуковые флуктуации плотности развиваются со скоростью звука. На эти зоны действуют более быстрые силы давления, создавая дополнительное вторичное возмущение плотности. Это вторичное возмущение (согласно принципу Гюйгенса) обязательно создаёт вторичную упругую волну. В соответствии с принципом суперпозиции эту волну можно рассматривать отдельно. Это **Волна Градиента Давления**. ВГД состоит из фронта сжатия и фронта разрежения. Однако в соответствии с направлением сил, создающих звуковые возмущения плотности, фронт сжатия ВГД направлен в сторону увеличения давления, а фронт разрежения ВГД – в противоположном направлении сторону (в сторону уменьшения давления).

ВГД возникают в каждой точке объёма, внутри которой произошли флуктуации плотности. Эта волна представляет собой последовательность волн сжатия, распространяющихся в направлении увеличения давления, и последовательности волн разрежения, распространяющихся в противоположном направлении. В ограниченном объёме ВГД нагревают стенку, ограничивающую зону высокого давления, и охлаждают стенку (или область) сниженного давления. В таком объёме ВГД переносят энергию из зоны низкого давления в зону высокого давления.

Концепция ВГД полностью описывает температурные эффекты в газах, в том числе эффекты Ранка и Гартмана-Шпренгера, а также результаты всех экспериментов. На основе явления ВГД может быть создан новый тип теплового насоса. Физика процесса позволяет обоснованно предсказать, что эти новые тепловые насосы будут более эффективными, чем существующие.

Трубки Гартмана - Шпренгера

Нагревание в эффекте Гартмана – Шпренгера) объяснялось **ударными волнами**.

Действительно, при работе этого устройства безусловно образуются УВ, и они проникают в полость, дно которой нагревается.

Схема Трубки Гартмана – Шпренгера (ТГШ) показана на рис.2.

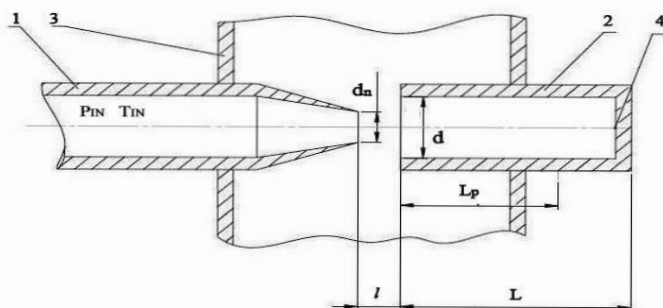
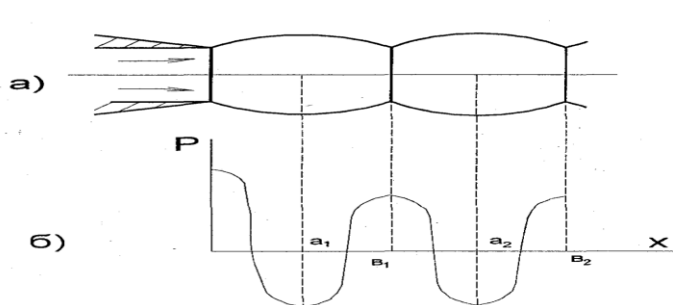


Рис. 2 Схема Трубки Гартмана – Шпренгера: 1 – сопло; 2 - полость; 3 - стенка канала; 4 - термопара; d_n - диаметр сопла; d - диаметр полости; l - зазор между соплом и полостью; L - глубина полости; L_p - глубина проникновения струи; P_{in} - входное давление; T_{in} - температура на входе.

Нет сомнения, что "пережатая" струя в пространстве между соплом и полостью создаёт бочкообразные пульсации, Рис.3. Скорость газа в областях расширения сверхзвуковая. При этом генерируются УВ, которые проникают в полость ТГШ. Глубина проникновения потока



L_p зависит от параметров струи и от геометрии устройства. Важно подчеркнуть, что глубина проникновения струи L_p всегда меньше глубины полости ТГШ L ($L_p < L$) то есть ударная волна не достигает дна полости. Вырожденная УВ ("нулевой скачок" [12, глава 3], когда скорости газа до и после разрыва равны), преобразуется в зону сжатия в звуковой волне.

Рис. 3 Форма поверхности струи и распределение в ней давления при сверхкритическом истечении газа из сопла

Этот факт подтверждён экспериментами [13], в которых давление на дне полости измерялось высокоскоростным датчиком. Зафиксированные изменения давления на дне полостей ТГШ имеют периодическую "пилообразную" форму с зонами сжатия и разрежения, которые характерны для мощных звуковых волн, изучаемых нелинейной акустикой. Таким образом, внутри полости ТГШ энергия УВ выделяется в верхней части трубки; и ударные волны не могут нагревать дно полости, где фиксируются самые высокие температуры.

Фотография периодических структур, рис. 4, подтверждает отсутствие ударной волны внутри полости ТГШ.

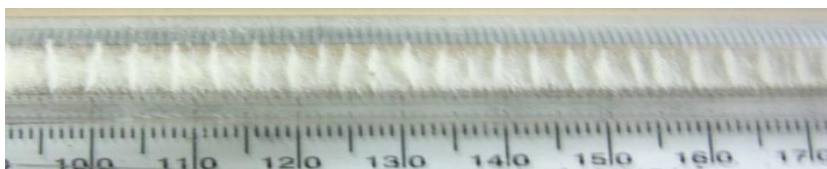


Рис. 4 Фотография периодических структур внутри прозрачной полости ТГШ.

Сфотографированная полость ТГШ была изготовлена из прозрачной плексигласовой трубки (диаметр полости 14 мм, глубина полости 375 мм). Трубка полости была установлена горизонтально. В полость был засыпан тонкий порошок. Воздушная струя проникала в полость горизонтально вдоль оси.

При вводе воздушной струи в полость наблюдался интересный эффект. На фотографии показано стационарное состояние. Частицы порошка перегруппировывались в периодические структуры. Эти структуры образуются в результате воздействия звуковой стоячей волны на тонкие частицы внутри полости НСТ, подобной тому, как это происходит внутри известной трубки Кундта. Фотография демонстрирует ситуацию, когда частицы сгруппированы в виде "пластинок" в узлах стоячей волны. Наличие периодических структур внутри полости НСТ, в которую входит газовая струя, **находится в противоречии с представлением о том, что УВ достигает дна полости ТГШ.** Данное наблюдение подчёркивает тот факт, что глубина проникновения струи (и проникновения УВ) невелика, и что в большей части объёма полости звуковая волна распространяется через покоящийся газ. Следовательно, этот факт является дополнительным подтверждением того, что в этом устройстве ударные волны не переносят энергию ко дну полости ТГШ.

Кроме того, как описано в [5], значительное нагревание дна полости ТГШ наблюдалось при малых давлениях на сопле (докритических условиях), **когда образование УВ невозможно.**

Дополнительным аргументом, который ставит под сомнение ответственность УВ за нагрев полости ТГШ, являются режимы работы, когда УВ существует, а нагрев отсутствует. Действительно, УВ всегда возникают, когда отношение давления на сопле превышает

критическое значение. Однако, нагрев (а также мощный звук) возникают только в узком диапазоне расстояний между соплом и полостью ТГШ.

Короткая вихревая камера

В вихревых трубах (эффект Ранка) микро-холодильные циклы были предложены как источник нагрева и охлаждения. Предполагалось, что горячие и холодные микрообъемы формируются в результате процессов, проходящих внутри вихревого слоя, затем эти микрообъемы разделяются.

Неожиданное обнаружение разогрева боковой стенки короткой вихревой камеры стимулировало наши исследования в области температурного разделения. На рис.5 схематично изображена короткая вихревая камера с отношением высоты к диаметру 0.18 (вихревых трубах это отношение 10–30).

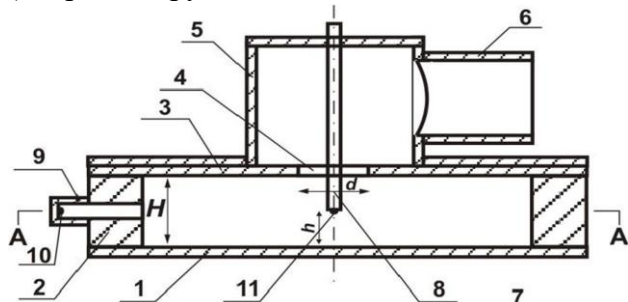


Рис.5 Экспериментальная вихревая камера (схематическое изображение; поперечный разрез). 1-нижний диск; 2-цилиндрическая боковая стенка; 3-верхний диск; 4-выходная диафрагма; 8-центральный стержень; 9-заглушенный боковой патрубок; 10 - «горячая» термопара; 11 - «холодная» термопара; d- диаметр выходной диафрагмы.

В этом устройстве сжатый воздух при комнатной температуре нагнетался от боковой стенки к центру вихревой камеры [7]. В экспериментах на периферии вихревой камеры была получена максимальная температура 465°C, а в центральной зоне - минимальная температура -45°C. Мощный поток воздуха нагнетается от периферии к центру вихревой камеры. Воздух выходит из камеры через диафрагму 4. Если в этой вихревой камере присутствуют «горячие» микрообъемы, они не могут перемещаться на периферию из-за мощного радиального воздушного потока к центру. Следовательно, концепция микро-холодильных циклов не может объяснить нагрев периферии внутри этого устройства.

Вместе с тем, влияние **ударных волн** на первый взгляд вполне возможно. Действительно, воздух входит в камеру тангенциально через 4 цилиндрических сопла, установленные на боковой стенке 2. Фотография, рис.6, показывает фрагмент боковой стенки, включающий 3 тангенциальных сопла, имеющих прямой выход в камеру.



Рис.6 Фотография - фрагмент боковой стенки вихревой камеры.

Эксперименты выполнялись на режимах с давлением на входе в сопла до 7 бар. Соответственно выходящие в камеру струи вполне могут быть «пережаты», иметь сверхкритическую структуру, как на рис. 3, с образованием ударных волн.

Для исследования этого вопроса была выполнена серия экспериментов. Измерения давлений на короткой вихревой камере [7] дали неочевидный результат. Значение отношения давлений на сопле P_{out}/P_{in} во всех режимах работы было больше, чем критическое значение для воздуха, то есть 0,53. Например, когда давление на входе в сопла было равно 7 бар, значение выходного давления равнялось 4,6 бар и отношение давлений равнялось $4.6 \div 7 \approx 0.66$. Этот результат показывает, что возможные значения скорости входных струй в этом устройстве являются дозвуковыми и что **ударные волны в вихревой камере не возникают**.

На рис.7 помещена диаграмма, показывающая зависимость измеренных значений отношения α от давления на входе в вихревую камеру.

Измерения были выполнены для вихревых камер с различными диаметрами выходных диафрагм d .

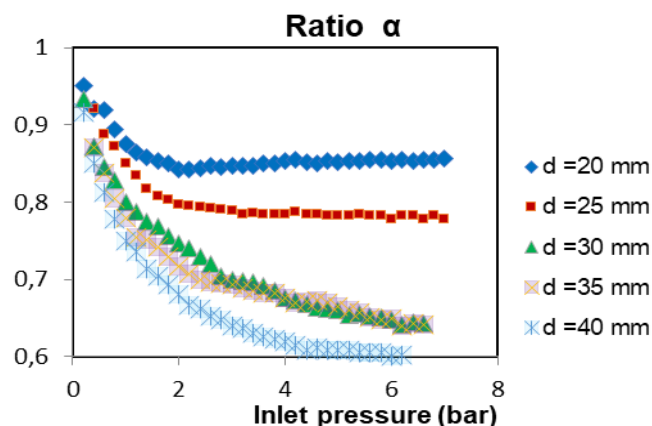


Рисунок 7. Отношение α , как функция давления на входе в вихревую камеру. Значения α приведены для установок с диаметрами выходных диафрагм: 20 мм, 25 мм, 30 мм, 35 мм и 40 мм.

$$\alpha = \frac{P_{side\ wall} + 1}{P_{input} + 1}$$

P_{input} - входное давление (бар),

P_{side} - давление на боковой стенке (бар)

Значение отношения α определяет величину скорости воздушных струй, входящих в вихревую камеру. Важно указать, что α больше 0,53 (критического значения для воздуха) для всех диаметров диафрагм на всех режимах течения. Это обстоятельство означает, что скорости струй на входе в вихревую камеру во всех экспериментах были ниже скорости звука. Следовательно, течение вихревого потока не сопровождалось распространением ударных волн внутри вихревой камеры.

Выявленная автомодельность является интересной задачей для теоретиков и относится к области экспериментальных парадоксов.

Выводы

Ранее выдвигавшиеся теории о возможном влиянии ударных волн на нагрев газа при температурной сепарации в трубках Гартмана-Шпренгера и в короткой Вихревой Камере проверены в серии экспериментов. Результаты экспериментов показали, что Ударные Волны при работе этих устройств не образуются или не влияют на температурное разделение. Следовательно, перенос энергии в этих устройствах осуществляется упругими Волнами Градиента Давления.

Исследование явления переноса энергии в сжимаемых средах упругими Волнами Градиента Давления финансировалось в 2014 – 2015гг и в 2020 – 2022гг Министерством энергии Израиля.

Литература

1. В.Птицын, Б.Фиалков *К вопросу о влиянии колебаний давления газового потока на теплообмен в слое*, Акустический Журнал, 15, с.468, 1969.
2. R. Soloff, *Sonic Drying*, J. Acoustic Soc. Am. Volume 36, Issue 5, pp. 961-965 (1964).

3. М.В.Дмитриев, Л.И.Панов, *Влияние низкочастотного акустического излучения на температуру нагретого тела*, Технология и конструирование в электронной аппаратуре. № 2, 2008.
4. G.J. Ranque, *Method and Apparatus for Obtaining from Fluid under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures*, US Patent No. 1,952281, 1934.
5. Von Herbert Sprenger. *Über thermische Effekte in Resonanzrohren*, Mitteilungen aus dem Institut fuer Aerodynamik, Zurich, vol. 21, 1954, pp. 18-35.
6. Brocher E., Ardissone J.P., *Heating Characteristics of a new type of Hartman-Sprenger tube*, International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol.4, No. 2, 1983, pp. 97-102.
7. Beliaevsky Y. Experimental investigation of a temperature separation effect inside a short vortex chamber. Proc. of 9 Int. Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malta, pp. 1482-1487, 2012.
8. Beliaevsky Y. The Pressure Gradient Elastic Wave: Energy Transfer Process for Compressible Fluids with Pressure Gradient. J. of Mech. Engineering and Automation. 3: 1, 53-64, 2013
9. Beliaevsky, The influence of sound on heat transfer in gases, *Electronic Journal "Technical Acoustics"*, 6, 2014
- 10 Beliaevsky Y. Experimental arguments in favour of heat transfer in compressible fluids by Pressure Gradient Elastic Waves, Int. Journal of Heat and Mass Transfer, 107: 723–728. 2017
11. US Patent 9670938 B2. Method and devise for transfer of energy, Y. Beliaevsky, 2013.
12. Mises R. *Mathematical Theory of Compressible Fluid Flow. Chapter 1.4*, Academic press, New York, 1958.
13. Bouch D.J., and Cutler A.D., Investigation of a Hartmann – Sprenger tube for passive heating of scramjet injectant gases, *AIAA*, 2003, pp1275