

Experimental arguments in favour of heat transfer in compressible fluids

by Pressure Gradient Elastic Waves

Yan Beliaevsky

P.G.W 2014 Ltd., Israel

Экспериментальные подтверждения существования теплопереноса в сжимаемых средах Волнами Градиента Давления.

Ян Белявский

P.G.W 2014 Ltd., Israel

E-mail superfin@netvision.net.il

РЕЗЮМЕ

Результаты многочисленных научных исследований показывают, что звук оказывает влияние на тепловые процессы в газах. К этому классу эффектов относятся также и эффекты Ранка (Ranque) и Гартмана-Шпренгера (Hartmann-Sprenger). Существующие конвенциональные теории не могут объяснить процессы переноса тепла в устройствах, действующих на основе этих эффектов.

Концепция Волн Градиента Давления дает физическое описание теплообмена в этих процессах. Волны Градиента Давления это упругие волны звукового типа. Эти волны возникают в сжимаемых средах (в газах) при одновременном существовании в объеме газа градиента давления и стартовых флуктуаций плотности (при воздействии звука). При этих условиях на микрообъем, соответствующий флуктуации плотности, воздействуют силы давления, направленные вдоль вектора градиента давления. Причем, результирующие силы действуют на флуктуацию сжатия и флуктуацию разрежения в противоположных направлениях. Фронт сжатия Волны Градиента Давления распространяется в направлении увеличения давления, а фронт разрежения – в противоположную сторону, в направлении уменьшения давления. Этот вид упругих волн переносит энергию из зоны низкого давления в зону высокого давления, при этом зона низкого давления охлаждается, а стенка, ограничивающая зону высокого давления, нагревается.

В статье представлены результаты экспериментов, выполненных автором на короткой вихревой камере и на тепловых трубках Шпренгера. Приведены величины максимально возможных уровней нагрева и охлаждения. Показано, что конвенциональные теории, которые ранее использовались для объяснения эффектов Ранка и Гартмана-Шпренгера, принципиально не могут объяснить полученные результаты

1. Введение

Опубликованы результаты многочисленных научных исследований о влиянии звука на температурные процессы в газах (на нагревание [1], на сушку [2] и на охлаждение [3]). Временное отсутствие адекватного понимания физической основы этих процессов вынуждает нас отнести их к ряду физических парадоксов. Температурные эффекты Ранка (Ranque) [4] и Гартмана-Шпренгера (Hartmann-Sprenger) [5, 6] также должны быть отнесены к этому же классу явлений. Для объяснения этих эффектов привлекались различные концепции. Адиабатический сброс давления при ускорении струй в соплах рассматривался как источник охлаждения газа. Процесс нагревания объяснялся вязким трением газовых струй или (в эффекте Гартмана-Шпренгера) ударными волнами. Микро-холодильные циклы (или взаимодействие вихрей) также привлекались для объяснения этих эффектов. В соответствии с этими концепциями, горячие и холодные микрообъемы, полученные в результате этих процессов, затем разделялись. Однако, до настоящего времени не существует теорий, адекватно описывающих процессы, протекающие в устройствах, которые используют эти эффекты [7, 8].

В последнее время были опубликованы результаты исследования температурной сепарации в короткой вихревой камере [9, 10 и 11]. В этом устройстве сжатый воздух при комнатной температуре нагнетался от боковой периферийной стенки к центру вихревой камеры. В экспериментах на периферии вихревой камеры была получена максимальная температура 465 °С, а в центральной зоне - минимальная температура –45 °С. Эти результаты не могут быть объяснены на основе концепций, описанных выше.

При работе всех указанных выше устройств режимы температурного разделения всегда сопровождалось сильным звуком. Шпренгер [6], Гольдштик [12] и Куросака [13] указывали, звук оказывает влияние на процессы температурной сепарации в вихревых трубах. Более того, несмотря на тот факт, что газовые потоки в вихревых трубах и в звуковом генераторе Гартмана радикально различаются, Шпренгер утверждал [6], что тепловые эффекты в обоих устройствах имеют одну и ту же физическую природу. На основе выполненных исследований, представленных в данной статье (анализ температурных эффектов в описанный выше устройствах), можно сделать вывод, что утверждение Шпренгера является верным. Однако, его замечание, что вращение газа

в вихревых трубах не является необходимым для температурного разделения, ошибочно. Наоборот, вращение газа необходимо для создания градиента давления.

Концепция Волн Градиента Давления (ВГД) предложена и обоснована в [9, 10 и 11]. ВГД это особый тип упругих волн, возникающий в сжимаемых средах (в газах) при существовании градиента давления и в присутствии стартовых флуктуаций плотности (звука). Самым важным свойством ВГД является то, что они переносят энергию из зоны низкого давления в зону высокого давления. Этот теплоперенос не зависит от температурного градиента.

Концепция ВГД является новой и неожиданной и ещё не принята научным сообществом в целом. Тем ни менее, представленные в этой работе результаты экспериментов, которые не могут быть объяснены на основе существующих конвенциональных теорий, подтверждают концепцию ВГД.

2. Волны Градиента Давления

2.1. Основные положения

В этом разделе коротко вводится концепция ВГД. Для выполнения этой цели, примем четыре утверждения (которые обычно не вызывают возражений).

- Любое воздействие на газ, приводящее к созданию градиента давления, можно моделировать полем объемных сил.
- Область флуктуации плотности в газе можно представить как микрообъем, на границы которого воздействуют силы давления.
- Силы давления являются "быстродействующими" силами, скорость изменения которых превышает скорость звука
- Любое воздействие, приводящее к созданию флуктуации плотности в газе, создает упругую волну (принцип Гюйгенса для газов).

Рассмотрим быструю флуктуацию плотности возникшую внутри объема газа, в котором существует градиент давления. Плотность газа изменилась от $\rho_s(r)$ до $\rho_s(r) \pm \Delta\rho$, где $\pm\Delta\rho$ - амплитуда флуктуации. При рассмотрении баланса сил на границах микрообъема (зоны флуктуации) видно, что градиент давления создает результирующую силу воздействующую на зону флуктуации. Выражение для ускорения, которое определяет величину дополнительной силы, воздействующей на зону стартовой флуктуации плотности, получено в [10].

$$\mathbf{u}(r) = \mathbf{u}_f(r) \frac{\Delta\rho}{\rho_s(r) + \Delta\rho}$$

Здесь $\mathbf{u}_f(r)$ ускорение, характеризующее объемную силу, создающую градиент давления. (Например, для вращения с постоянной угловой скоростью $\mathbf{u}_f(r) = \omega^2 r$). Чем больше градиент давления (определяемый ускорением $\mathbf{u}_f(r)$), и чем больше амплитуда $\Delta\rho$ стартовой флуктуации плотности,

тем больше величина результирующей силы, воздействующей на зону флуктуации. Если значение $\Delta\rho$ положительно (сжатие) эта сила направлена в сторону увеличения давления и она дополнительно сжимает зону начального сжатия. Если $\Delta\rho$ отрицательно (разрежение) эта сила действует в направлении снижения давления и она дополнительно уменьшает давление, созданное полем сил, воздействующих на зону стартового разрежения. Силы давления являются быстродействующими. Стартовая флуктуация развивается со скоростью звука, и все это время быстродействующие силы давления воздействуют на зону флуктуации, создавая вторичное возмущение плотности.

В соответствии с принципом Гюйгенса (как указано выше), вторичное возмущение плотности в зоне стартовой флуктуации обязательно создает вторичную упругую волну. Эта волна описывается волновым уравнением и распространяется со скоростью звука. Принцип суперпозиции волн позволяет рассматривать эту волну отдельно. Кроме того, эта волна обладает уникальными свойствами, что позволяет нам выделить эту вторичную волну в отдельный тип упругих волн в газах - **Волну Градиента Давления**.

Как можно видеть из вышеприведенных аргументов, существование ВГД вытекает непосредственно из установленных физических принципов и не требует дополнительных доказательств. Однако, в статье [14] математически моделируется распространение звука внутри газовой центрифуги. Сделан вывод о том, что упругие волны в газе в присутствии градиента давления проявляют уникальные свойства, кардинально отличающиеся от свойств акустических волн при нормальных условиях. Эта статья может служить теоретическим подтверждением правильности концепции ВГД.

2.2. Свойства Волн Градиента Давления

Перечисленные ниже свойства ВГД основаны на приведенных выше аргументах, вытекающих из общих физических принципов, и на соотношениях, опубликованных в [9] и [10]. ВГД возникают в газах при двух необходимых условиях: существовании стартовых флуктуаций плотности и существовании градиента давления.

- ВГД всегда направлена вдоль вектора градиента давления, не смотря на то, в каком направлении распространяется стартовая звуковая волна.

- Фронт сжатия и фронт разрежения в ВГД распространяются в противоположных направлениях: фронт сжатия – в направлении возрастания давления, а фронт разрежения – в направлении уменьшения давления. Фронт сжатия переносит реальное тепло, а фронт разрежения – несет реальное охлаждение.

- В ограниченном объеме ВГД не могут отразиться от стенок и двигаться в противоположном направлении. Они гасятся за счет интерференции. По этой же причине ВГД не

могут пройти через зону экстремума давления (например, через центр вращения) и поглощаются в этой зоне.

- ВГД охлаждают стенку, расположенную в зоне низкого давления и нагревают стенку, расположенную в зоне высокого давления.

Подача теплоносителей в соответствующие зоны позволяет осуществлять перенос тепла, который не зависит от температурного градиента. То есть, возникает потенциальная возможность создать новый тип тепловых насосов.

3. Результаты экспериментов (критический обзор)

В этом разделе обсуждаются конвенциональные подходы, привлекавшие для объяснения температурных эффектов Ранка и Гартмана-Шпренгера. Установка, которая была использована в экспериментах, описана в [9] и [10]. В этих же работах описаны измерительные приборы и указаны точности измерений.

3.1. Термодинамические процессы

3.1.1 Микро-холодильные циклы

Микро-холодильные циклы были предложены как источник нагревания и охлаждения в вихревых трубах (эффект Ранка). Горячие и холодные микрообъемы формируются в результате процессов, проходящих внутри вихревого слоя, затем эти микрообъемы разделяются.

Температурная сепарация, обнаруженная и исследованная в короткой вихревой камере [9, 10], опровергает эту концепцию.

На Рисунке 1 схематично изображена модифицированная (упрощенная) вихревая камера. Эта упрощенная вихревая камера отличается от полной установки тем, что в ней отсутствует выходной коллектор.

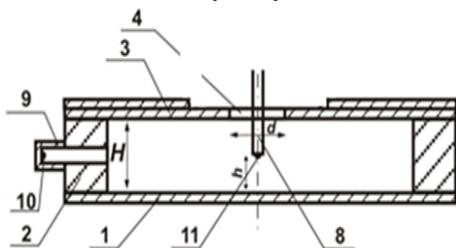


Рис.1 Модифицированная экспериментальная вихревая камера (схематическое изображение; поперечный разрез). 1-нижний диск; 2-цилиндрическая боковая стенка; 3-верхний диск; 4-выходная диафрагма; 8-центральный стержень; 9-заглушенный боковой патрубок; 10 - «горячая» термопара; 11 - «холодная» термопара; d-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

Воздух входит в камеру тангенциально через сопла, установленные на боковой стенке 2. Мощный поток воздуха нагнетается от периферии к центру вихревой камеры. Воздух выходит из камеры через диафрагму 4 непосредственно в окружающее пространство. Обратите внимание на две термопары, показанные на рисунке 1. «Холодная» термопара 11 была укреплена на конце

центрального стержня. «Горячая» термопара 10 была установлена на заглушенном торце бокового патрубка.

Были выполнены эксперименты с различными диаметрами d выходной диафрагмы. Максимальное температурное разделение имело место при $d = 30$ мм. В режиме максимального температурного разделения температура на периферии достигала $+465$ °С, а в центре -45 °С. При больших и меньших диаметрах диафрагмы 4 тепловое разделение также имело место, но оно было более слабым.

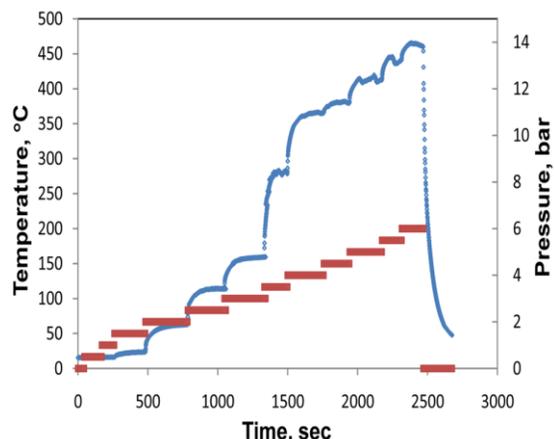


Рис.2 Температура («горячая» термопара) и входное давление. Экспериментальные точки фиксировались с интервалом 1сек. Эксперимент выполнен на вихревой камере с выходной диафрагмой $d = 30$ мм. Давление на диаграмме - манометрическое давление (атмосферное давление равно нулю).

Диаграмма (Рисунок 2) демонстрирует файл экспериментальных точек (показания датчиков). В этом эксперименте был достигнут максимальный нагрев dna заглушенного бокового патрубка (термопара 10). Давление поддерживали на постоянном уровне, пока температура увеличивалась и стабилизировалась. Затем давление увеличивали с шагом 0,5 бар. Видно например, при давлении 4,5 бар наблюдался резкий рост температуры со значительной тепловой мощностью. Видны отдельные экспериментальные точки, которые фиксировались каждую секунду. Самая высокая температура достигнута при 7 бар.

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.

3.1.2. Процессы нагрева

Была выдвинута концепция нагревания микрообъемов газа вследствие некоторого термодинамического цикла при трении (эффект Гартмана-Шпренгера) или при взаимодействии вихрей (эффект Ранка).

Однако выше было показано, что смещение горячих микрообъемов на периферию (когда и если они создаются

в вихревом слое) невозможно внутри экспериментальной вихревой камеры. Тем не менее, нагревание имеет место.

Более того, определим максимально возможный нагрев газа. Компрессор, используемый во время экспериментов, описанных в [9] и [10], сжимал воздух от давления $P_1 = 1$ бар до $P_2 = 7$ бар. Так как температура сжатого воздуха на выходе из компрессора выравнивается с температурой окружающей среды, мы будем рассматривать процесс изотермического сжатия при $T \sim 300$ К. Легко определить физическую работу сжатия для этого процесса. Если вся эта энергия (вследствие некоего гипотетического процесса) преобразуется в тепло, то температура воздуха увеличится только на 166 К.

В экспериментах на вихревой камере [9], и в многочисленных экспериментах с трубками Гартмана-Шпренгера [5, 6], были получены значительно более высокие температуры. То есть, уровень теоретически возможного максимального нагрева воздуха существенно ниже, чем фактический нагрев, полученный в экспериментах. Таким образом, термодинамическое преобразование газа не может объяснить наблюдаемое нагревание. Следовательно, этот нагрев обусловлен другими процессами.

3.1.3. Процессы охлаждения

С точки зрения конвенциональных теорий, охлаждение газа в описанных выше устройствах может быть получено только за счет энергии сжатого воздуха, а процессами охлаждения газа могут быть только адиабатический (политропный) сброс давления и / или дроссель-эффект (эффект Джоуля - Томсона).

Эксперименты на короткой вихревой камере [9] позволяют оценить теоретическое максимально возможное охлаждение, обусловленное этими эффектами и сравнить его с измеренным охлаждением.

Предположим, что воздушная струя при сбросе давления преобразуется только вследствие процессов охлаждения, и именно эта струя охлаждает холодную термopара 11 (Рисунок 1). Ускорение воздуха во впускном сопле будем рассматривать как адиабатический процесс, а его движение в вихревом слое как дроссель-процесс. При давлении на входе в сопло 7 бар, давление на выходе сопла было равно 4,6 бар [9]. Адиабатическое охлаждение воздуха при таком перепаде давления составляет не более 34К. Расчет охлаждения воздуха за счет дроссель-эффекта от 5 бар до 1 бар представлен в [6], и величина этого охлаждения равна 0,3 К.

Таким образом, значение максимально возможного охлаждения воздуха не превышает 35К. Но в реальном эксперименте, при входном давлении 7 бар, термopара 11 (Рисунок 1) зафиксировала снижение температуры на 65К. Следовательно, обычные термодинамические процессы не могут объяснить охлаждение газа в рассматриваемых устройствах.

3.2. Упругие волны

В газах существуют два типа упругих волн: ударные волны и звуковые волны (звук, ультразвук и инфразвук).

Многие авторы упоминают эти волны при объяснении рассматриваемых температурных эффектов.

3.2.1. Волны звукового типа

Амплитуда и частота звуковых волн определяются характеристиками колебаний или пульсаций источника звука. В звуковой волне зоны сжатия и разрежения чередуются и распространяются от источника звука. Звуковая волна переносит энергию, полученную из источника. Безусловно, поглощение звуковой волны приводит к высвобождению этой энергии, что приводит к увеличению температуры газа (охлаждение невозможно). Однако величина этого нагрева очень мала. Термopары, установленные вблизи даже очень мощных источников звука, не показывают реального изменения температуры. Это происходит из-за того, что увеличение температуры в зонах сжатия волны компенсируется снижением температуры в зонах разрежения. Таким образом, звуковые волны не могут охлаждать газы, а степень нагрева газов при их поглощении пренебрежимо мала.

3.2.2. Ударные волны

Ударные волны (УВ) распространяются со сверхзвуковой скоростью. Их возникновение связано с образованием новой массы газа (взрыв) или со сверхзвуковым движением. УВ может перенести значительное количество энергии. Это всегда волна сжатия. Ударных волн разрежения не существует. При распространении, энергия и скорость УВ уменьшаются. Когда скорость УВ становится равной скорости звука, она преобразуется в звуковую волну. Таким образом, УВ не может охлаждать газ, а степень ее влияния на нагрев должна рассматриваться для каждого устройства отдельно.

а) Измерения давлений на короткой вихревой камере [9] 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 входное давление было равно 7 бар, значение выходного давления равнялось 4,6 бар и отношение давлений равнялось $4,6 : 7 \approx 0,66$. Этот результат показывает, что возможные значения скорости входных струй этом устройстве являются дозвуковыми и что **ударные волны в вихревой камере не возникают**. Этот вывод можно распространить на вихревые трубки (эффект Ранка), поскольку вход газа в этом устройстве такой же как в вихревых камерах.

б) В трубках Гартмана-Шпренгера (HST) дно полости, установленной напротив сопла, может нагреваться до значительных температур. Во время эксперимента [5] с использованием гелиевой струи, температура дна полости достигала ~ 1000 °С, причем начальный нагрев (от 27 °С до 300 °С) происходил за время 1,7 мсек.

Полость трубки Гартмана-Шпренгера характеризуется глубиной проникновения потока L_p , которая зависит от параметров струи и от геометрии HST. На глубине большей чем L_p газ практически неподвижен. Нет

сомнения, что "пережатая" струя в пространстве между соплом и полостью создает пульсации, которые генерируют УВ, и что эти УВ проникают в полость. Однако, важно подчеркнуть, что если глубина проникновения струи L_p лежит в диапазоне $L_p < L$, то ударная волна не достигает дна полости. Вырожденная УВ ("нулевой скачок" [15, глава 3], когда скорости газа до и после разрыва равны), преобразуется в зону сжатия в звуковой волне. Этот факт подтвержден экспериментами [16], в которых давление на дне полости измерялось высокоскоростным датчиком. Зафиксированные изменения давления на дне полостей HST имеют периодическую "пилообразную" форму с зонами сжатия и разрежения, которые характерны для мощных звуковых волн, изучаемых нелинейной акустикой. Таким образом, внутри полости HST энергия УВ выделяется в верхней части трубки; и ударные волны не могут нагревать дно полости, где фиксируются самые высокие температуры.



Рис. 3 Фотография периодических структур внутри прозрачной полости звукового генератора Гартмана.

Фотография периодических структур (Рисунок 3) подтверждает отсутствие ударной волны внутри полости HST. Сфотографированная полость HST 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 HST, 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 HST, в которую входит газовая струя, **находится в противоречии с представлением о том, что УВ достигает дна полости HST.** Данное наблюдение подчеркивает тот факт, что глубина проникновения струи (и проникновения УВ) невелика, и что в большей части объема полости звуковая волна распространяется через покоящийся газ. Следовательно, этот факт является дополнительным подтверждением того, что в полости HST энергия передается только посредством PGEW.

с) Кроме того, как описано в [6], значительное нагревание дна полости HST наблюдалось при докритических условиях, **когда образование УВ невозможно.**

д) Дополнительным аргументом, который ставит под сомнение ответственность УВ за нагрев полости HST, 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 HST.

3.3. Новые эксперименты

В дополнение к обсуждению процессов в устройствах, рассмотренных выше, "конвенциональные" теории не могут в принципе быть использованы для объяснения результатов экспериментов, включенных в данный раздел.

3.3.1. Охлаждение "холодной" термопары

В экспериментальной установке на Рисунке 1 воздух выходит из вихревой камеры непосредственно в окружающее пространство. Центральная (осевая) зона вихревой камеры характеризуется отрицательным давлением во всех режимах работы. В центральной зоне вокруг центрального стержня формируется обратный поток. Этот поток хорошо изучен как теоретически, так и экспериментально (например, [12] и [17]). Осевая скорость потока в этой области направлена вертикально вниз в вихревую камеру. Радиальная скорость направлена от центра к периферии. На всех режимах работы, давление в этой зоне было отрицательным, и воздух (20 °C) входил в центральную зону вихревой камеры. Именно этот воздух омывал центральный стержень и термопару 11. Не взирая на это, эта термопара показывала устойчивое охлаждение (Рисунок 4) [10], которое увеличивалось с увеличением входного давления.

Таким образом, выявлено, что существует процесс охлаждения, при котором воздух из внешней среды охлаждается во время движения вдоль центрального стержня без участия в основном вихревом движении и без реального сброса давления. **Никакой конвенциональный процесс не может объяснить это охлаждение.**

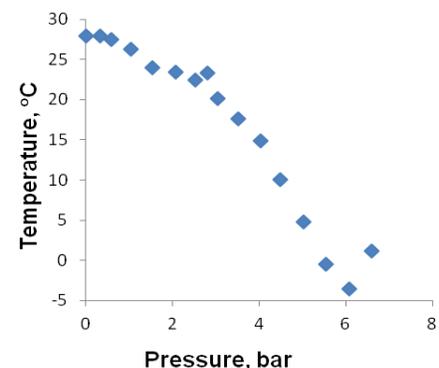


Рис.4 Температура, измеренная "холодной" термопарой 11 (Рисунок 1) в зависимости от входного давления.

3.3.2. Разрыв полиэтиленовых трубок

Полиэтиленовые трубки соединяли датчики давления с измеряемыми точками на боковой стенке во время экспериментов с короткой вихревой камерой, Рисунок 1. Эти трубки были многократно прорваны давлением внутри вследствие их нагрева. Резонно предположить, что места разрыва трубок соответствуют точкам их максимального нагрева. Воздух внутри этих трубок неподвижен. И, если какой-либо конвенциональный процесс нагревает воздух на периферии вихревой камеры, то максимальный нагрев должен быть в точке, непосредственно прилегающей к внешней поверхности боковой стенки.



Рис.5 Прорванный участок полиэтиленовой трубки

Однако прорванные давлением отверстия всегда находились на расстоянии 100-150 мм от боковой стенки в месте перегиба трубки, (Рисунок 5). **Используя ранее известные физические процессы, невозможно объяснить наблюдаемый нагрев полиэтиленовых трубок.**

3.3.3. Нагревание дополнительных полостей

Неожиданный эффект был обнаружен, когда воздух, нагнетался в сопло звукового генератора Гартмана (HST), рядом с которым была установлена дополнительная полость. На некоторых режимах работы, были нагреты днища обеих полостей, включая полость, в которую не входила воздушная струя.



Рис.6 Экспериментальная сборка: 1 Полость напротив сопла; 2 Вход в сопло; 3 Дополнительные полости; 4 Воздушный канал.

На рисунке 6 показана фотография одной из экспериментальных установок, используемых для изучения этого эффекта.

Полость HST-1 была изготовлена так, что практически не нагревалась, но генерировала очень громкий свист. Поток воздуха выходил через один или через оба открытых конца канала - 4. При подаче воздуха через сопло 2, термопары, установленные на заглушенных днищах всех дополнительных полостей 3, показали повышение температуры. Степень нагревания зависела как от режима воздушной струи (имевшей комнатную температуру), так и от геометрического размещения деталей сборки. Скорости нагрева дополнительных полостей существенно меньше, чем скорость нагрева дна полости, установленной напротив сопла HST. Процесс оптимизация конструкции еще не завершен, но (на момент написания этой статьи) на днищах дополнительных полостей были зафиксированы температуры, достигающие 280 °С. Чем большим был нагрев дополнительных полостей, тем больше было охлаждение выходящего воздуха.

Понятно, что внутри дополнительных полостей движение воздуха отсутствует. Этот факт был подтвержден специальными экспериментами с использованием дополнительной цилиндрической полости, заполненной тонким порошком, стенки которой были прозрачными и которая была установлена горизонтально. Во всех рабочих режимах HST порошок заполнял объем прозрачной дополнительной полости и был сформован в виде пластин или скоплений, соответствующих полоскам в трубке Кундта (аналогично фотографии на рисунке 3).

Суммируем изложенное выше:

Генератор Гартмана создает мощный звук;

Воздушный поток перемещается внутри канала 4;

Внутри дополнительных полостей воздух неподвижен;

Днища дополнительных полостей нагревается до значительных температур и в то же время охлаждается отходящий из сборки воздух.

Нам трудно найти адекватное объяснение этого эффекта на основе конвенциональных термодинамических концепций.

4. Объяснение результатов экспериментов на основе на концепции ВГД

Невозможно сделать определенные выводы о процессах, описанных в [1], [2] и [3] из-за отсутствия полных описаний оборудования и воздушных потоков. Однако важно подчеркнуть, что для этих процессов характерны следующие характеристики: процессы происходят в газах, и воздействие звука имеет резонансный характер, то есть величина эффекта зависит от частоты звука. Эти обстоятельства позволяют нам с большой долей вероятности сказать, что основой этих процессов является теплоперенос посредством ВГД.

Концепция ВГД полностью и четко объясняет температурные эффекты Ранка и Гартмана-Шпренгера, а

также эффекты, описанные в этой статье. Все эти процессы происходят в газах (сжимаемых средах) и сопровождаются громким звуком. Во всех процессах в объеме газа, в котором происходит температурное разделение, существует градиент давления. Таким образом видно, что выполнены все три требования, необходимые для возникновения ВГД. Возникающие ВГД переносят тепло из зоны низкого давления к стенке, расположенной в зоне высокого давления.

В вихревых трубках Ранка и в вихревых камерах градиент давления создается вращением, с зоной минимального давления в центре и с зоной максимального давления на периферии - то есть на боковой стенке. Соответственно, тепло передается от центра к периферийной боковой стенке.

В трубках НСТ (эффект Гартмана-Шпренгера) зона минимального давления расположена в области максимальной скорости воздушной струи, а зона максимального давления расположена вблизи заглушенного дна полости, установленной напротив сопла.

При нагревании дополнительных полостей используется звук, генерируемый звуковым генератором Гартмана. В этом устройстве существует динамический градиент давления. Минимальная зона давления расположена в области максимальной скорости воздушной струи или в воздушном потоке, движущемся над полостью. Зона максимального давления расположена вблизи заглушенного дна дополнительной полости.

Интенсивность передачи тепла волнами ВГД определяется величиной градиента давления, амплитудой и частотой стартовых звуковых колебаний плотности, свойствами газа и геометрией рабочего объема. На уровень полученных температур влияют как скорость передачи тепла за счет ВГД, так и скорость тепло (холодо) - переноса внутри конкретного устройства.

5. Заключение

1. Анализ исследований температурных эффектов в газах показал, что "конвенциональные" теории фундаментально не могут объяснить полученные экспериментальные результаты, а именно:

- В вихревой камере мощный поток воздуха нагнетается от периферии к центру; поэтому горячие микрообъемы не могут нагревать боковую стенку, так как они не могут двигаться в направлении, противоположном потоку воздуха.

- Нагревание не может быть объяснено действием Ударных Волн. Ударные волны отсутствуют в вихревой камере и в вихревых трубках (эффект Ранка) и не достигают дна полостей (эффект Гартмана-Шпренгера).

- Максимальные температуры нагрева и охлаждения рассчитаны как результат термодинамических преобразований сжатого воздуха. Реальные изменения температур, достигнутые в экспериментах, намного выше расчетных максимальных изменений температур.

2. Мы затрудняемся предложить какое-либо адекватное объяснение (основанное на "конвенциональных" термодинамических концепциях) для результатов следующих экспериментов:

- Воздух всасывался из комнаты в центральную область вихревой камеры. Этот воздух омывал термоду, установленную на конце центрального стержня. Однако эта термоду показывала стабильное охлаждение, которое увеличивалось с увеличением входного давления.

- Полиэтиленовые трубы были многократно прорваны давлением изнутри в точках максимального нагрева. Если какой-либо процесс нагревает воздух на периферии вихревой камеры, то точка максимального нагрева должна находиться рядом с внешней поверхностью боковой стенки. Однако прорванные отверстия всегда находились на расстоянии 100-150 мм от боковой стенки в месте изгиба трубы.

- Движение воздуха отсутствует внутри дополнительных полостей, установленных возле звукового генератора Гартмана. Тем не менее, температура 280°C была зафиксирована на дне дополнительной полости. И чем выше было нагревание полостей, тем выше было охлаждение выходящего воздуха.

3. Предложенная концепция Волн Градиента Давления (PGEWs) адекватно описывает все экспериментальные результаты. ВГД это сорт упругих волн звукового типа (т. е. ВГД распространяется со скоростью звука). ВГД возникают в газах (сжимаемых средах) при наличии градиента давления и звуковых флуктуаций плотности. Результирующие силы давления действуют на области звуковых флуктуаций плотности и создают вторичное возмущение. Возникающие вторичные волны (ВГД) обладают уникальными свойствами: фронты сжатия и разрежения этих волн двигаются в противоположных направлениях. ВГД передают тепло из зоны низкого давления к стенке, расположенной в зоне высокого давления

Acknowledgements

The field of research presented in this paper (especially the project: Highly efficient generation of heat pumps, operating on the basis of the physical phenomenon "Pressure Gradient Elastic Wave) funded in 2015 - 2016 from the fund of research and development of Ministry of National Infrastructures, Energy and Water Resources of Israel.

References

- [1] Ptitsyn V., Fialkov B. On the influence of gas flow pressure oscillations on heat transfer in the layer, *Acoustic Journal*, Vol. 15, 1969, pp. 468, (Russian)
- [2] Soloff R. Sonic Drying, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 36, 5, 1964, pp. 961-965
- [3] Dmitriev M., and Panov L., Influence of low-frequency acoustic radiation on the temperature of the heated body, *Technology and design in electronic equipment*, 2008, 2, (Russian)

- [4] Pat. 1,952281. US. Method and Apparatus for Obtaining from Fluid under Pressure Two Currents of Fluids at Different Temperatures, Ranque G.J., 1934
- [5] Brocher E., and Ardissone J.P., Heating Characteristics of a new type of Hartman-Sprenger tube, *International Journal of Heat and Fluid Fl*, Vol. 4. 2, pp. 97-102
- [6] Sprenger H. Beobachtungen an Wirbelrohren (Observation of the Vortex Tube), *Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Physik*, Vol. 2, 1951
- [7] Bondarenko V., and Koshevoy S., The geometric optimization of the gas-dynamic generator of cold on the basis of the Hartmann-Sprenger tube for application in neon helium mixture purification technology, *Refrigeration technique and technology*, Vol. 4, 2006, (Russian)
- [8] Xue Y., Arjomandi M., and Kelso R., A critical review of temperature separation in a vortex tube, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34. 8, 2010, pp.1367-1374
- [9] Beliaevsky Y., Experimental investigation of a temperature separation effect inside a short vortex chamber, *Proceedings of the 9th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Malta*, July 2012, pp. 1482-1487
- [10] Beliaevsky Y. The Pressure Gradient Elastic Wave: Energy Transfer Process for Compressible Fluids with Pressure Gradient, *Journal of Mechanics Engineering and Automation*, Vol. 3. 1, 2013, pp. 53-64
- [11] Beliaevsky Y., The influence of sound on heat transfer in gases, *Electronic Journal "Technical Acoustics"*, 6, 2014
- [12] Goldshtik M., *Vortex Flows*. Nauka, Novosibirsk, 1981, pp. 305-311, (Russian).
- [13] Kurosaka M., Acoustic streaming in swirling flow and the Ranque-Hilsch (vortex-tube) effect, *Journal of Fluid Mechanics*. 124, 1982, pp. 139-172.
- [14] Bogovalov S., Kislov V., and Tronin I., Waves in strong centrifugal fields: dissipationless gas, *Theor. Comput. Fluid Dyn.*, 29, 2015, pp. 111–125.
- [15] R. Mises, *Mathematical Theory of Compressible Fluid Flow*, Academic Press, New York, 1958.
- [16] Bouch D.J., and Cutler A.D., Investigation of a Hartmann – Sprenger tube for passive heating of scramjet injectant gases, *AIAA*, 2003, pp1275.
- [17] Smulsky I.I. *Aerodynamics and processes in the vortex chambers*, Nauka, Novosibirsk, 1981, (Russian).