

УДК 536.24.01

## ТЕПЛОПЕРЕНОС В СЖИМАЕМЫХ СРЕДАХ ВОЛНАМИ ГРАДИЕНТА ДАВЛЕНИЯ. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ПОДЛЕЖАЩИЕ ОБСУЖДЕНИЮ.

**Я. Д. Белявский**

*PG Wave Ltd. Israel*

**Аннотация** Волны Градиента Давления (ВГД) возникают в сжимаемых средах, когда одновременно в области пространства существуют градиент давления (вращение, замедление...) и происходят флуктуации плотности (звук, турбулентность). Появление ВГД в замкнутом объёме приводит к переносу энергии, в результате чего нагревается стенка в зоне высокого давления и охлаждается зона низкого давления.

В докладе представлены результаты экспериментов, обосновывающие правильность и корректность концепции ВГД. Делается акцент на интересных результатах, которые подлежат обсуждению и пониманию.

Результаты некоторых экспериментов публикуются впервые, к ним относится:

- Зависимость степени нагрева дна полости трубки Гартмана-Шпренгера от ориентации в пространстве.

**Ключевые слова:** Сжимаемые среды; Теплоперенос; Градиент давления; Флуктуации плотности; Волна Градиента Давления.

В статьях и докладах 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 сжимаемых средах (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 рассматривалось 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 (ВК). Результаты экспериментов подтвердили вывод о том, что ранее существовавшие теории не могут объяснить температурное разделение в газах. 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 ВГД, и направлением распространения. ВГД возникают в объёме (пространстве) при одновременном выполнении трех условий: объём заполняет сжимаемая среда (газ); в этом объёме существует градиент давления; и генерируются стартовые флуктуации плотности (звуковые или турбулентные).

Обоснование существования ВГД не требует введения новых физических сущностей и основывается на классической термодинамике, точнее на неравновесной термодинамике (системы с градиентом давления, который возникает при воздействии внешних сил).

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

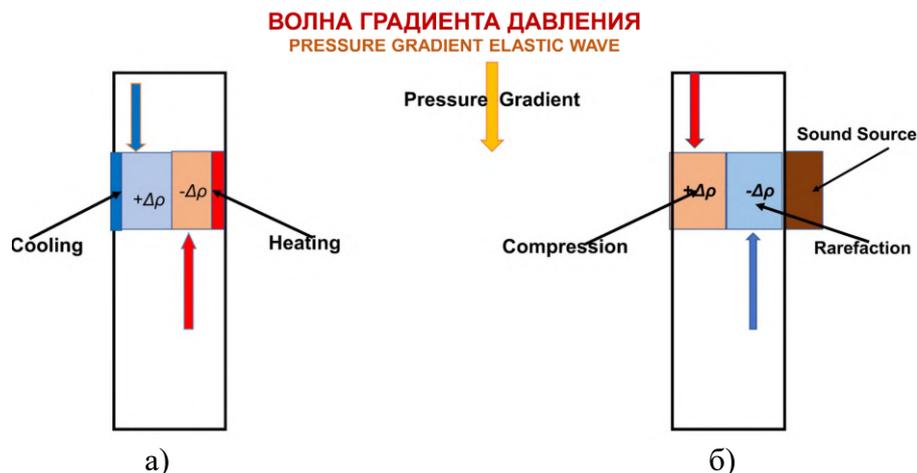


Рис. 1. Удлиненный объём, заполненный газом, в присутствии градиента давления.

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.1(а) 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.1(б) 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 и есть **Волна Градиента Давления**. ВГД состоят 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 (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 (ТН). Физика процесса позволяет обоснованно предсказать, что эти новые ТН будут более эффективными, чем существующие сегодня.

### **Короткая вихревая камера**

Неожиданное обнаружение температурного разделения в короткой ВК стимулировало исследования этого эффекта, что привело к пониманию явления и выдвижения концепции ВГД [7].

Воздух нагнетался в ВК с отношением высоты к диаметру  $H/D=0.18$  при комнатной температуре. В режиме максимального температурного разделения температура на периферии достигала  $465^{\circ}\text{C}$ , а температура в центральной зоне снижалась до  $-45^{\circ}\text{C}$ . Наблюдаемое температурное разделение возможно, если тепло передаётся из центра на периферию. Но в этой ВК мощный поток движется от периферии к центру, и теплоперенос за счёт смещения горячих микрообъёмов в противоположном направлении на периферию невозможен.

Экспериментальная установка схематически изображена на Рис.2. ВК состоит из: нижнего диска (1), цилиндрической боковой стенки (2), и верхнего диска (3). На цилиндрической боковой стенке (2) выполнены четыре тангенциальных сопла диаметром 5мм (7). Воздушные струи входили в камеру под углом  $20^{\circ}$  к касательной. Вращающийся поток двигался от периферии к центру, затем выходил через диафрагму (4) в выходной коллектор (5). Центральный стержень (8) был установлен коаксиально с выходной диафрагмой (4). Заглушенный боковой патрубком (9) был укреплен на наружной поверхности цилиндрической боковой стенки (2). Цилиндрический патрубок (9) имел полость диаметром 8мм и длину 32мм. Эксперименты были выполнены с выходными диафрагмами (4) с диаметрами ( $d = 20\text{мм}, 25\text{мм}, 30\text{мм}, 35\text{мм}, \text{и } 40\text{мм}$ ).

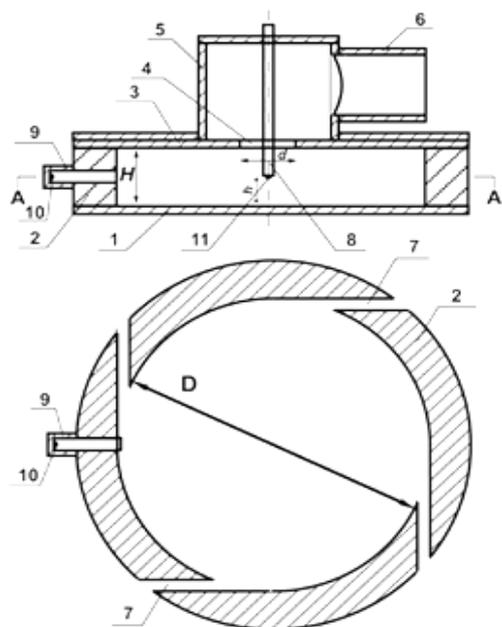


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментальной вихревой камеры;  
 Верх: фронтальное сечение; Низ: сечение, вид сверху.  
 Установка включает следующие детали: 1. Нижний диск, 2. Цилиндрическая боковая стенка, 3. Верхний диск, 4. Выходная диафрагма, 5. Выходной коллектор, 6. Выходной патрубков, 7. Тангенциальные сопла, 8. Центральный стержень, 9. Заглушенный боковой патрубков, 10. "Горячая" термопара, 11. "Холодная" термопара. D – Диаметр Вихревой Камеры (140 мм); H – Высота Вихревой Камеры (25 мм); d – Диаметр выходной диафрагмы; h – Расстояние между центральным стержнем и нижним диском.

Диаграммы Рис.3 и Рис.4 показывают зависимость температур, измеренных двумя термопарами (10) и (11) от входного давления. "Холодная" термопара (11) была укреплена на нижнем конце центрального стержня, а "горячая" термопара (10) на заглушенной крышке внутри бокового патрубка (9). Рис.3 показывает результаты измерений для ВК с выходной диафрагмой 30мм, Рис.4 - для диаметров выходных диафрагм 20мм, 25мм, 35мм и 40 мм.

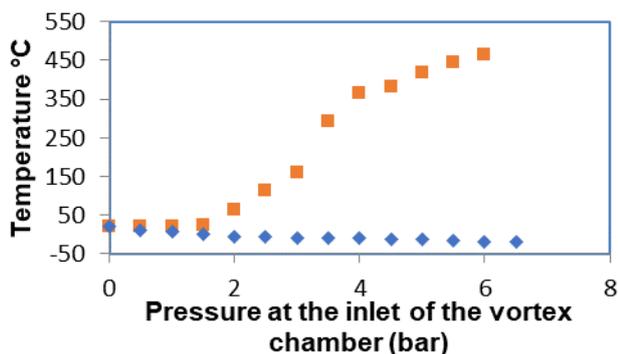


Рис. 3. Зависимость температуры от входного давления для установки с диаметром выходной диафрагмы  $d=30$ мм.

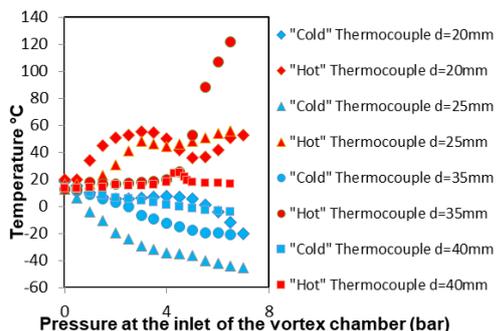


Рис.4. Зависимость температуры от входного давления для установок с диаметрами выходных диафрагм  $d= 20$ мм, 25мм, 35мм и 40мм.

Максимальное температурное разделение получено на ВК с выходной диафрагмой  $d = 30$ мм. Зафиксирована наибольшая температура  $465^{\circ}\text{C}$  при давлении  $P_{\text{exр}} = 6$ бар и минимальная температура  $-45^{\circ}\text{C}$  при давлении  $P_{\text{exр}} = 7$ бар.

Экспериментальные точки на диаграммах характеризуют стационарные значения температур и давлений. При изменении давления значение температуры устанавливалось через некоторый промежуток времени и далее оставалось неизменным.

Существовавшие ранее теории (предлагаемые для объяснения эффекта Ранка) не объясняют нагревание периферии в этой ВК. Теплоперенос за счёт смещения горячих микрообъёмов из центра к боковой стенке невозможен. Кроме того, эти теории не объясняют существование оптимального значения диаметра выходной диафрагмы  $d = 30$ мм, при котором температурное разделение максимально.

Концепция ВГД полагает, что при  $d = 30$ мм объём камеры соответствует условиям звукового резонанса. Действительно, подача воздуха в ВК на всех режимах сопровождалась очень сильным звуком. Анализ звукового спектра, выполненный для камеры с  $d = 30$  мм, показал, что при давлении выше 1.7 бар возникает узкий пик при частоте  $\sim 3$  кГц. Амплитуда

пика росла при увеличении давления и значительно превышала базовый уровень шума. При дальнейшем повышении давления появлялся второй пик с частотой  $\sim 6$  кГц. Наблюдения показали, что уровень эффекта температурной сепарации в ВК возрастает в соответствии с интенсивностью звука.

### Отношение давлений (вход/выход) на соплах в короткой вихревой камере

Измерение давлений на ВК (Рис.2) дало интересный и неочевидный результат. Значение отношения давлений на соплах  $P_{out}/P_{in}$  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  $4.6 : 7 \approx 0.66$ .

Диаграмма Рис.5 показывает зависимость измеренных значений отношения  $\alpha$  от давления на входе в ВК. Измерения были выполнены для ВК с различными диаметрами выходных диафрагм  $d$ .

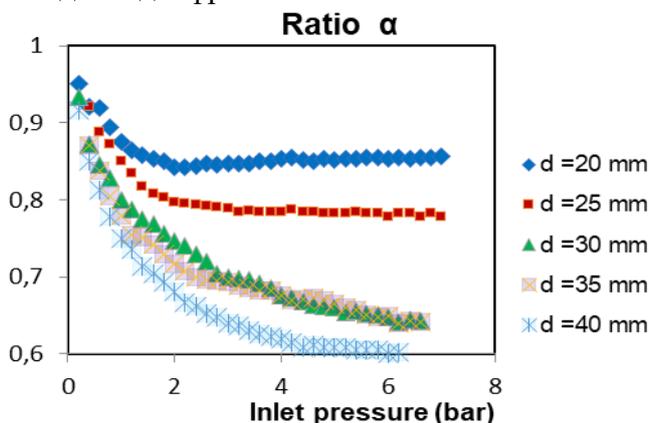


Рис. 5. Отношение  $\alpha$ , как функция давления на входе в вихревую камеру. Значения  $\alpha$  приведены для установок с диаметрами выходных диафрагм:  $D = 20$  мм, 25 мм, 30 мм, 35 мм и 40 мм.

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

$P_{input}$  - входное давление (бар),  
 $P_{side}$  - давление на боковой стенке (бар)

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

Струи, выходящие из сопел в ВК, формируют закрутку вихревого слоя. Скорость этих струй определяет тангенциальную скорость вращения слоя, которая в свою очередь определяет величину давления на боковой стенке. **Выявленная автомодельность является экспериментальным парадоксом и интересной задачей для теоретиков.**

### Распределение температур внутри вихревой камеры

В режиме максимального разогрева ( $d = 30$  мм) на периферии ВК выделялась значительная тепловая энергия. Разогревался не только боковой патрубок (9), но и вся массивная боковая стенка. Боковой патрубок, изготовленный из PVC, был расплавлен и прорван давлением. Полиэтиленовые трубки, соединяющие боковую стенку и периферийные области нижнего диска с датчиками давления, также многократно разрывались давлением вследствие расплавления.

Диаграмма Рис.6 демонстрирует показания термопар в зависимости от давления на входе в ВК. Рис. 3 и Рис. 6 отражают зависимости, полученные во время одного и того же эксперимента с  $d = 30$  мм (при других диаметрах эффект разогрева существенно меньше). Например, при давлении на входе  $P_{exr} = 6$  бар были зафиксированы следующие температуры: на боковой стенке  $60^{\circ}\text{C}$ ; в точке 50 мм от центра  $37^{\circ}\text{C}$ ; в точке 25 мм от центра  $33^{\circ}\text{C}$ . Это охлаждение не может быть объяснено быстрым снижением давления. В камерах с

диафрагмами  $d = 25\text{мм}$  и  $20\text{мм}$  давление на боковой стенке и соответственно градиент давления выше, сброс давления более крутой, но охлаждение потока более слабое.

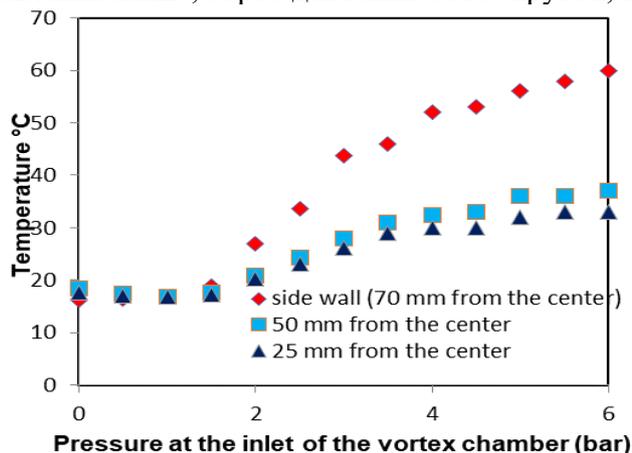


Рис.6. Температуры внутри вихревой камеры в зависимости от входного давления. Термопары установлены: на боковой стенке (70мм от центра) и на нижнем диске (50мм и 25мм от центра).

Чтобы снять предположение, что источником нагревания является полость 10, был выполнен эксперимент на ВК без полости, который практически повторил результаты Рис.6.

Выполненные ранее эксперименты показали, что охлаждение воздуха при выходе из цилиндрического сопла существенно меньше, чем адиабатное охлаждение при перепаде давления вход/выход. Термопары диаметром 0.7мм на выходе из 5мм сопел показывали нагревание пристенного слоя внутри сопла, которое обусловлено трением. Температура на выходе из ВК обычно снижалась по отношению к входной температуре не более, чем на 5К.

Воздух входил в ВК при температуре ниже 18°C. На всех давлениях максимальная температура — это температура пристенного слоя воздуха. Смещаясь к центру, воздух охлаждался. При входном давлении 6 бар, смещение на 20мм от стенки соответствует охлаждению потока на 23°C (Рис.6).

**Возникают три вопроса. Какой процесс нагревает пристенный слой воздуха? Почему выходная диафрагма  $d=30\text{мм}$  даёт существенно большее нагревание, чем большие и меньшие диаметры? Ведь струями воздуха через сопла в ВК вводится одинаковая энергия. Какой процесс ответственен за охлаждение потока в ВК?**

Концепция ВГД утверждает, что во всём объёме ВК звуковые и турбулентные флуктуации плотности порождают волны сжатия и разрежения, которые распространяются вдоль вектора градиента давления (по радиусу ВК) в противоположных направлениях. Волны звукового типа практически не поглощаются в газах на небольших расстояниях. Отражённые от боковой стенки волны сжатия взаимопогашаются в результате интерференции и выделяют принесённое в эту область тепло. Диссипация волн разрежения происходит в центре ВК в зоне минимального давления с выделением холода.

### Влияние смещения центрального стержня на нагрев периферии вихревой камеры

Зафиксировано влияние изменения расстояния  $h$  между центральным стержнем 8 и нижним диском 1 на температуру “горячей” термопары (10) (Рис.2).

Диаграмма (Рис.7) иллюстрирует экспериментальные точки температуры (термопара 10) и давления на стенке ВК в зависимости от расстояния  $h$ . Эксперимент был выполнен на установке с диаметром выходной диафрагмы  $d=30\text{мм}$  при постоянном входном давлении  $P_{\text{exр}} = 4\text{бар}$ . Первая точка ( $h = 0$ ) отражает положение, когда стержень касался нижнего диска. Центральный стержень смещался на 5мм, удерживался в этом положении до стабилизации параметров, затем смещение продолжалось. Выше 25мм стержень смещался вне ВК. Конечная позиция  $h = 110\text{мм}$  соответствует ситуации, когда центральный стержень был полностью извлечён из удерживающей цанги. Максимальная температура 212°C зафиксирована при  $h = 50\text{мм}$ .

Интересно, что вместе с температурой "горячей" термопары синхронно изменялось также значение давления на стенке ВК. Выявленные зависимости являются неожиданными. Действительно, входное давление постоянно, а значит неизменными являются скорости и расходы воздуха на входе в ВК. Следовательно, все характеристики вихревого потока в ВК постоянны.

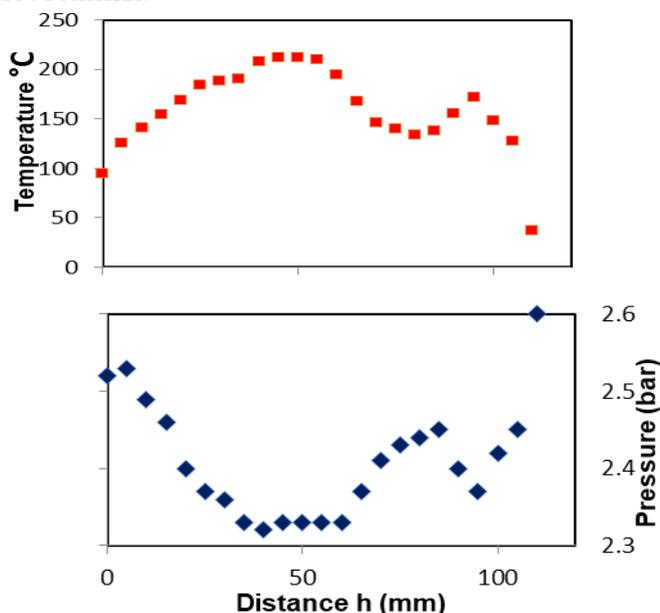


Рис. 7. Температура (°C), измеренная "горячей" термопарой, установленной внутри заглушенного бокового патрубка и давление на боковой стенке (бар) в зависимости от расстояния  $h$  между центральным стержнем и нижним диском

*Без привлечения концепции ВГД невозможно объяснить, как изменение расстояния  $h$  влияет на температуру внутри бокового патрубка. Энергия, которую переносят ВГД, определяется градиентом давления и значением стартовой флуктуации плотности (амплитудой стартовой звуковой волны). Изменение положения центрального стержня безусловно меняет акустические характеристики ВК. Для подтверждения правильности этого предположения необходимо повторить этот эксперимент одновременно с измерением акустических характеристик системы.*

Влияние положения центрального стержня на величину давления на боковой стенке (Рис.7) скорее всего объясняется изменением температуры пристенных слоёв воздуха. Известно, что нагревание дозвукового потока газа внутри трубы ведёт к возрастанию его скорости с одновременным снижением давления. Возможно, такой же процесс происходит в вихревом потоке. Если пристенные слои потока находятся в таком же "стеснённом" состоянии, то это позволяет объяснить полученные результаты. Повышение температуры пристенных слоёв ведёт к снижению давления, что указывает на одновременное увеличение кинетической энергии вихревого потока.

*С другой стороны, увеличение тангенциальной составляющей скорости пристенного потока должно увеличить давление на боковой стенке. Таким образом, выявленная закономерность нуждается в объяснении.*

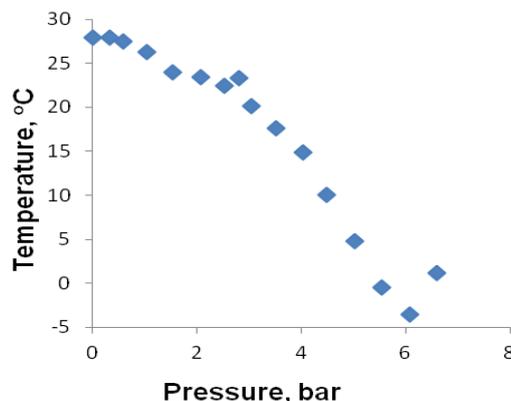
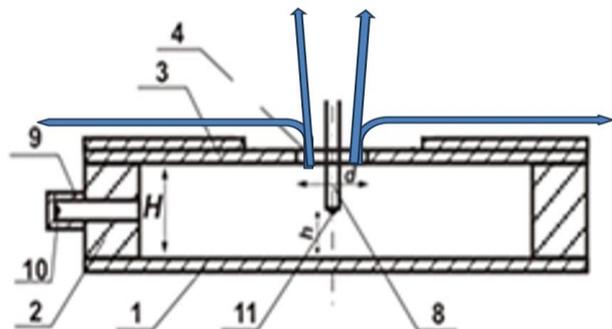
### Вихревая камера без выходного коллектора

Вихревой поток в ВК формирует центральную зону отрицательного давления. Размеры вакуумированной зоны формируются выходной диафрагмой. Эта зона доходит до нижнего диска и имеет воронкообразную форму. Измеренное давление в центре нижнего диска 1 (Рис. 2) на всех рабочих давлениях для всех диаметров выходных диафрагм 4 было отрицательным.

Максимально возможные температуры охлаждения воздуха оценены в предположении о двух последовательных процессах - адиабатном охлаждении при разгоне струи внутри сопла и затем дроссельном охлаждении до атмосферного давления. При давлении на входе в ВК 7бар на выходе из сопел давление равно 4.6 бар. Максимальное адиабатное охлаждение при

таким снижении давления равно 34 К. Дроссель эффект добавляет к этой величине не более 1К. Реальное же охлаждение, измеренное холодной термопарой 11, составляло 65 К. То есть реально полученные температуры охлаждения существенно превышают расчётное (максимально возможное) охлаждение.

На Рис.8 схематично изображена модифицированная ВК (выходной коллектор отсутствует). На диаграмме (Рис 9) показаны экспериментальные точки, соответствующие показаниям холодной термопары 11 для различных давлений на входе в ВК.



Модифицированная ВК (схематическое изображение; поперечный разрез). 1-нижний диск; 2-цилиндрическая боковая стенка; 3-верхний диск; 4-выходная диафрагма; 8-центральный стержень; 9-заглушенный боковой патрубкок; 10 - «горячая» термопара; 11 - «холодная» термопара.

Температура, измеренная «холодной» термопарой 11 в зависимости от входного давления.

Вихревой поток выходит из ВК тонким кольцевым слоем возле диафрагмы 4. В центральной зоне вокруг стержня 8 формируется поток, который хорошо изучен [12,13]. На всех режимах работы давление в центре нижнего 1 диска было отрицательным. Воздух (~20°C) всасывался из помещения в ВК вдоль центрального стержня 8, достигал нижнего диска, разворачивался, и выходил вместе с основным потоком. Именно этот воздух омывал центральный стержень и термопару 11.

Плотность всасываемого воздуха изменялась незначительно. Тем не менее термопара 11 показывала устойчивое охлаждение (Рис.9), которое увеличивалось с увеличением входного давления.

*Выявлено, что существует процесс охлаждения, при котором воздух из внешнего помещения 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 (без привлечения концепции ВГД).***

### Парадокс Гольдштика

Воздух выходит из ВК (Рис.8) вверх вдоль оси кольцевым слоем возле диафрагмы 4, сохраняя закрутку. Кажется очевидным, что выходящая струя должна иметь форму конуса. Причем, чем больше входное давление (расход через ВК), тем сильнее конус прижат к оси.

В действительности существует только два состояния выходящего потока вертикальное (узкая струя возле оси при большом расходе) и горизонтальное (перпендикулярное оси при малых расходах) [12], стр.255. При увеличении давления на входе в ВК выходящий поток перестраивается из горизонтального в вертикальный. При снижении давления выходящий поток перестраивается противоположным образом. При переходном давлении перестройка происходит скачком. Причём режим является относительно устойчивым. Перестройка может

происходить спонтанно, а может инициироваться внесением во внешний поток преграды, например рукой.

Интересно и важно то, что при скачке выходного потока из горизонтального в вертикальный, резко увеличивается давление на боковой стенке и возрастают значения температур (термопары 10 и 11). При противоположном изменении потока температуры снижаются.

*Обнаруженные изменения параметров безусловно указывают на то, что скачком изменяются не только направление выходящего из ВК потока. Здесь мы имеем дело с двумя разными типами вихревого потока внутри ВК. Остаётся, вопрос, как и почему эти два потока образуются? Ведь давление на входе в ВК постоянно, неизменна также внутренняя геометрия ВК.*

### Зависимость степени нагрева дна полости трубки Гартмана-Шпренгера от ориентации в пространстве

Схема устройства Трубки Гартмана – Шпренгера (ТГШ) изображена на Рис.10.

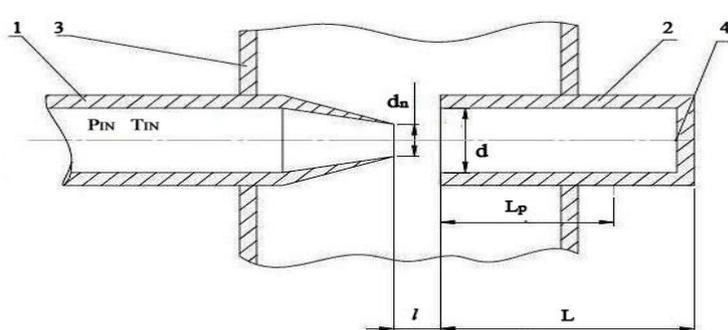


Рис.10. Схема устройства Трубки Гартмана -Шпренгера: 1 сопло; 2 полость; 3 стенки канала; 4 термопара;  $d_n$  диаметр сопла;  $d$  диаметр полости;  $l$  зазор между соплом и полостью;  $L$  глубина полости;  $L_p$  глубина проникновения струи;  $P_{in}$  входное давление;  $T_{in}$  температура газа на входе.

Дно полости, установленной напротив сопла, звукового генератора Гартмана разогревается до значительных температур [5]. В экспериментах [6] с использованием гелиевой струи на дне полости была достигнута температура  $\sim 1100$  °С. Отводя тепло от наружной стенки полости, и выводя газ из пространства между соплом и полостью, добиваются значительного снижения температуры газа.

Мы исследовали ТГШ целью увеличения эффективности теплосъёма, исходя из того, что теплоперенос в этом устройстве осуществляется ВГД. Понимание физики процессов позволило нам увеличить мощность теплосъёма в 3 раза по сравнению с классической схемой Рис10.

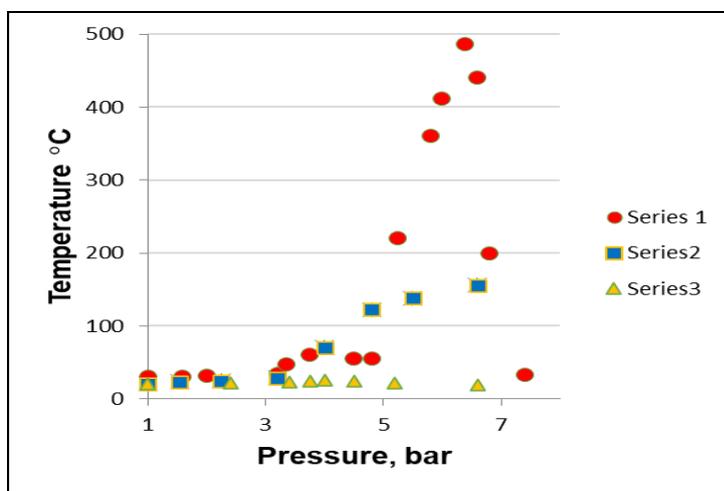


Рис.11. Показания термопары, установленной на дне полости ТГШ при различных значениях давления на входе в сопло

Уровень разогрева сборки ТГШ зависит от давления на входе в сопло и от геометрических характеристик. Диаграмма (Рис. 11) показывает температуры на дне полости в зависимости от входного давления. Нагревание (Рис.11) получено с использованием сопла диаметром 5мм. Серия 3 отражает постоянную температуру на стенке канала (отсутствие полости). В экспериментах (серии 1 и 2) использовалась полость диаметром 7мм, глубиной 15мм. Расстояние между соплом и полостью равнялось 7мм (серия 2) и 7.8мм (серия 1).

На сборке ТГШ с максимальным разогревом (серия 1) были выполнены дополнительные эксперименты с начальной температурой  $\sim 200^{\circ}\text{C}$ . Полость прогревалась снаружи электрическим нагревателем. После выключения нагревателя резко отодвигалась заслонка, и струя воздуха входила в полость. Конечные стационарные температуры полностью повторяли результаты (Рис.11).

*Понятно, что нагретый предмет можно охладить струёй воздуха, и при значениях входного давления 5 бар и более 7 бар. Так и происходило, полость резко охлаждалась. Но при давлении  $\sim 6$  бар – резко нагревалась?*

***Без привлечения концепции ВГД невозможно объяснить, почему при 5 бар и 7.5 бар полость охлаждается, а при 6 бар разогревается выше  $400^{\circ}\text{C}$ . Более того, можно утверждать, что при давлении 6 бар струя так же охлаждает дно полости, как и на других давлениях.*** Следовательно, зафиксированные максимальные температуры (Рис. 11) отражают динамическое равновесие между процессами охлаждения и интенсивным процессом разогрева волнами ВГД.

Температуры, отображённые выше на всех диаграммах, характеризуются временем стабилизации. Эти температуры остаются постоянными, пока неизменны режимы работы. Установившаяся температура во всех установках, где возникают ВГД, это результат динамического равновесия. Мы считаем, что основным процессом, конкурирующим с ВГД является создаваемая градиентом давления вынужденная конвекция. Интенсивность конвекции в сборках ТГШ значительно превышает интенсивность естественной гравитационной конвекции, поскольку градиент давления, создаваемый струёй, значительно превышает гравитационный градиент давления. Тем не менее, нами была изучена степень влияния естественной (гравитационной) конвекции на уровень нагревания сборки ТГШ.

В экспериментальной установке была реализована возможность плавного поворота сборки ТГШ на 180 градусов вокруг горизонтальной оси без изменения режима подачи воздуха. Диаграмма (Рис.12) содержит экспериментальные точки, иллюстрирующие изменение температуры на дне полости ТГШ (периодичность - через одну секунду).

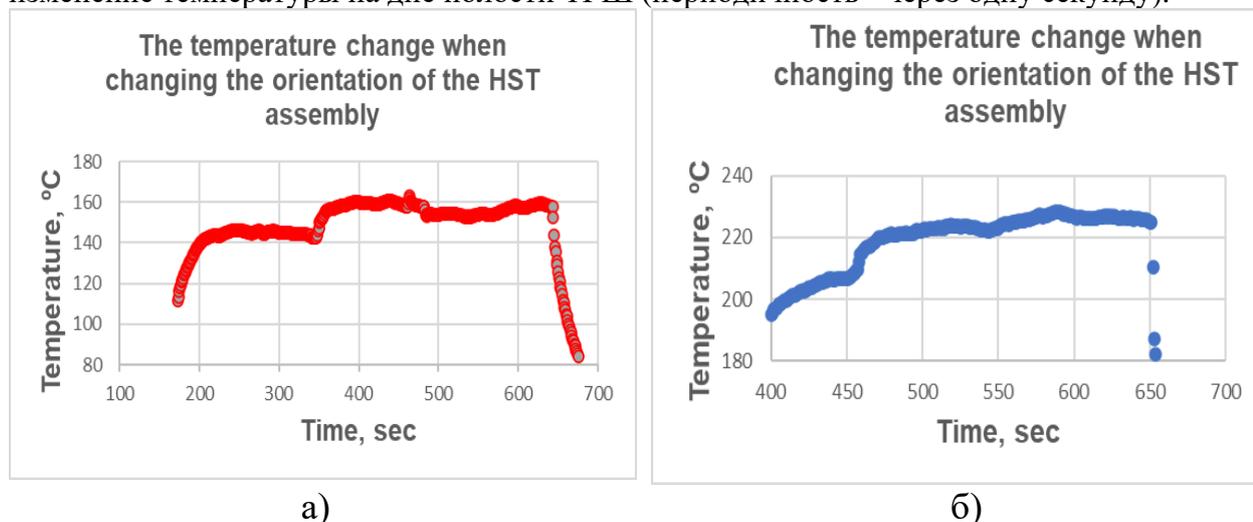


Рис.12. Температуры на дне сборки ТГШ в зависимости от ориентации в пространстве

Диаграмма (Рис. 12 а) показывает изменение установившейся температуры сборки HST при изменении положения относительно горизонтальной оси. Сборка а) включала сопло диаметром 2мм, полость диаметром 3мм, длиной 78мм, расстояние между соплом и полостью 5мм. Давление на входе в сопло поддерживалось равным 4,1 бар.

В начале струя из сопла была направлена сверху вниз. Этому положению соответствует температура 145°C. На 345 секунде, сборка была повернута на 180 градусов в новое вертикальное положение. Теперь струя из сопла была направлена снизу вверх (дно полости находилось вверху). На диаграмме видно, что этот поворот привел к повышению температуры до 160°C. На 485 секунде сборка была повернута в горизонтальное положение. Температура снизилась до 154°C. На 580 секунде сборку снова перевели в вертикальное положение (полость сверху) и температура повысилась до 160°C. На 640 секунде кран закрыт.

На (Рис. 12) б) помещены экспериментальные температуры измеренные через интервал 1 секунда для сборки ТГШ, отличие - длина полости равна 102 мм. На диаграмме б) также показано изменение установившейся температуры сборки HST при изменении её ориентации относительно горизонтальной оси. На протяжении всего эксперимента давление на входе в сопло поддерживалось на уровне 4 бар.

В начале эксперимента сборка HST находилась в положении - струя из сопла направлена сверху вниз. На этом режиме стационарная температура равнялась 208°C. Начало поворота сборки в горизонтальное положение (на 90 градусов) соответствует 460 секунде. При этом температура поднялась до 225°C. 550 секунда измерения соответствует началу поворота, при котором сборка была повернута до вертикального положения, отличающегося от исходного на 180 градусов. Теперь струя из сопла была направлена снизу вверх, а дно полости оказалось вверху. На диаграмме видно, что этот поворот привел к дальнейшему повышению температуры до 230°C. На 650 секунде воздушный кран был закрыт.

Результаты описанных выше экспериментов показали, что поворот сборки HST на 90 градусов из положения «полость внизу» в положение «горизонтально» увеличивает приращение температуры на  $8 \div 10$  %, а поворот сборки HST из нижнего положения. положение «полость внизу» на 180 градусов по отношению к положению «полость вверху» увеличивает приращение температуры на  $15 \div 30$ %.

*Столь существенное влияние ориентации сборки HST на равновесную температуру является неожиданным. Давление, создаваемое торможением струи в полости, приближается к значению начального давления на входе в сопло. Эта величина во много раз превышает градиент давления, создаваемого гравитацией.*

Понимание и объяснение этого эффекта основано на двух положениях:

1. ВГД это волны «звукового» типа. На коротких расстояниях (как в сборке ТГШ) эти волны практически не поглощаются. В полости ТГШ волны сжатия движутся ко дну полости, где в результате интерференции непосредственно у дна отраженная волна и последующая волна гасят друг друга. Именно в этой зоне наибольшего давления выделяется тепло.

2. Максимум изменения давления находится на входе в полость. Здесь струя тормозится, давление резко увеличивается. Глубже в полости давление увеличивается незначительно. Вблизи дна величина динамического градиента давления невелика. Поэтому влияние добавления (или уменьшения) гравитационной составляющей оказывает существенное влияние на процесс.

### **Обозначения**

ВГД – Волна градиента Давления;

ВК – Вихревая Камера;

ТГШ – Трубка Гартмана – Шпренгера;

$P$  – абсолютное давление, бар (атмосферное давление равно 1бар);

$P_{exr}$  – относительное (манометрическое) давление (атмосферное давление равно нулю), бар;

$h$  – Расстояние между центральным стержнем и нижним диском вихревой камеры, мм;

$d$  – Диаметр выходной диафрагмы, мм.

**Исследование явления переноса энергии в газах 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 констр. 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., Ardissonne 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 Compr. 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. Гольдштик М.А. Вихревые потоки. Наука, Новосибирск 1981.
13. Смутьский И. Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Наука Новосиб. 1981