

**АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ОРГАНИЗАЦИИ  
ЭНЕРГООБМЕНА В ВОЛНОВЫХ  
КРИОГЕНЕРАТОРАХ**

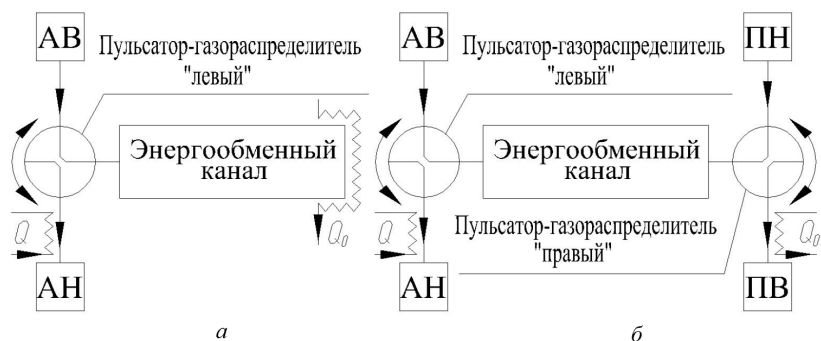
*Проведено обобщение материалов о волновых криогенераторах с энергообменными каналами. Выявлены основные возможные схемы организации энергообмена в волновых криогенераторах. Определено преимущество в эффективности схем энергообмена с двумя пульсаторами перед схемами с одним пульсатором. Сделан вывод о том, что самым эффективным с точки зрения организации энергообмена является роторный волновой криогенератор.*

**E-mail: malahov.s@bk.ru**

**Ключевые слова:** волновой криогенератор, ВКГ, энергообменник, роторный волновой криогенератор, волновой детандер-компрессор, пульсационный охладитель газа, полустатический обменник давления, резонансный охладитель газа.

На сегодняшний день известен целый ряд газорасширительных машин, которые можно объединить по следующему признаку — наличию энергообменного канала (ЭК), в котором происходит обмен энергией между активной и пассивной частями рабочего тела (средой) при их непосредственном контакте. К таким устройствам относятся криогенераторы Гиффорда–Мак-Магона с газовым поршнем, волновые криогенераторы (ВКГ), использующие эффекты Гартмана и Шпренгера (резонансные охладители газа), пульсационные трубки Гиффорда–Лонгсворда с отводом среды в теплой части, пульсационные охладители газа, полустатические обменники давления, энергообменники, волновые детандеры и роторные волновые криогенераторы (РВКГ). Исследование резонансных и пульсационных охладителей в МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством А.М. Архарова позволило сделать вывод о волновой природе энергообмена в этих аппаратах [1]. Параллельные исследования во ВНИИГАЗе пульсационных охладителей газа, энергообменников и созданных ими волновых детандеров привели к тому же выводу [2]. Таким образом, данный тип газорасширительных машин примененных в области низких температур можно определить как ВКГ с энергообменным каналом.

Как известно, основой для создания ВКГ послужило исследование Шпренгера [3], предложившего в звуковом генераторе Гартмана увеличить на порядок длину резонансной камеры. Эксперименты показали принципиальную возможность существенного повышения температуры в тупиковой части трубки (эффект Шпренгера). Исследования в МГТУ им. Н.Э. Баумана в направлении практического применения эф-



**Рис. 1. Конструктивные схемы ВКГ:**

*a* — с одним пульсатором; *б* — с двумя пульсаторами и петлевой схемой расположения источников и стоков

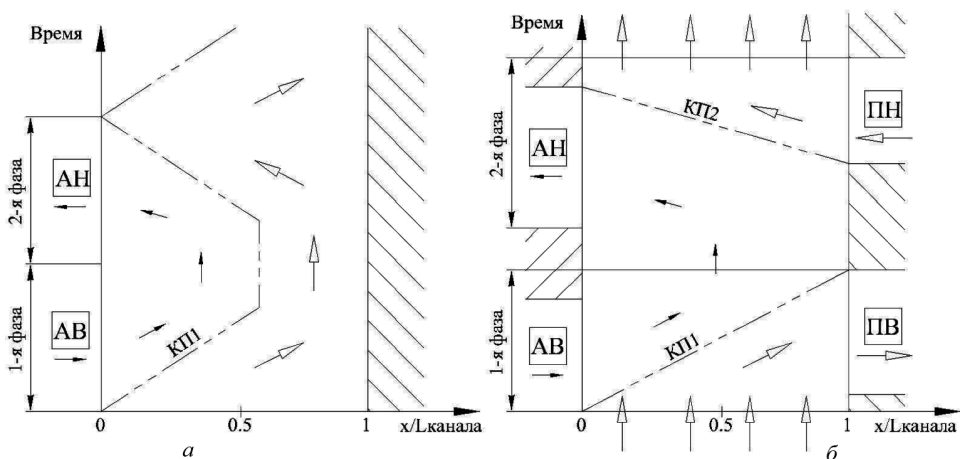
фектов Гартмана и Шпренгера привели к созданию новых методов генерации холода [4].

Основой энергообмена в канале ВКГ является наличие в нем пульсаций давления. Условно выделив в ВКГ пульсатор-газораспределитель (пульсатор) и энергообменный канал (ЭК), можно определить две основных конструктивных схемы: с одним пульсатором-газораспределителем (рис. 1, *a*) и двумя (рис. 1, *б*). Пульсатор является ключевым элементом ВКГ и обеспечивает пульсацию давления в ЭК (генерируя волны сжатия и разрежения) путем подачи и сброса сред высокого и низкого давления. Смещение сред, время подачи и сброса рабочего тела, задаваемые пульсатором, определяют эффективность всего устройства в целом.

Основной задачей ЭК является интенсификация энергообменного процесса. Рабочая (внутренняя) поверхность ЭК может представлять собой как простой цилиндр или параллелепипед, а может и поверхность со сложным переменным сечением (эллипсоидная, параболоидная поверхность и т.д.).

Энергообмен с одним пульсатором характерен для резонансных ВКГ и так называемых пульсационных генераторов холода; с двумя — для импульсных трубок с отводом среды в теплой части ЭК, волновых детандеров и РВКГ.

Работу всех ВКГ можно условно разделить на две фазы. Первая фаза начинается с подачи активной среды высокого давления (АВ) в ЭК, заполненный пассивной средой низкого давления (ПН). В начальный момент формируется контактная поверхность (КП), разделяющая пассивную среду, находящуюся в канале с активной средой, подаваемой в канал. Активная среда сжимает (нагревает) пассивную, что позволяет осуществлять отвод тепловой энергии  $Q_0$ . Для машин с одним пульсатором первая фаза заканчивается завершением подачи



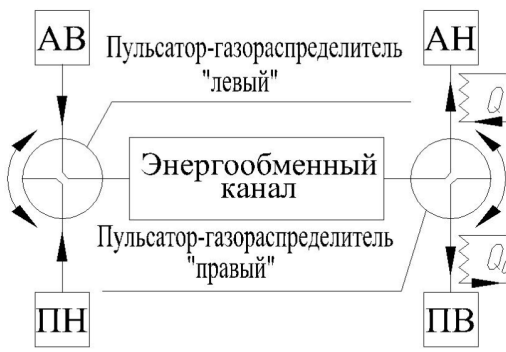
**Рис. 2. Диаграммы подачи сред ВКГ:**

*a* — с одним пульсатором; *б* — с двумя пульсаторами и петлевой схемой расположения источников и стоков

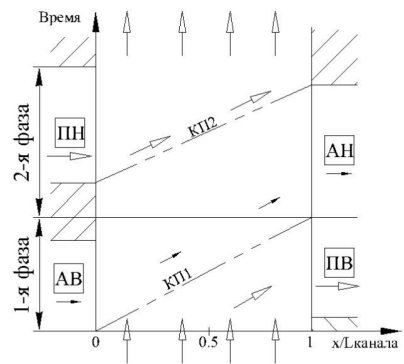
активной среды в ЭК (рис. 2, *a*), отвод тепловой энергии  $Q_0$  осуществляется с нагретого торца ЭК. Для машин с двумя пульсаторами первая фаза рабочего процесса заканчивается сбросом сжатой пассивной среды через правый пульсатор (рис. 2, *б*), что позволяет организовать отвод тепловой энергии  $Q_0$  за пределом ЭК, и в дальнейшем использовать механическую энергию сжатого пассивного газа.

Вторая фаза рабочего процесса начинается со сброса активной среды из ЭК через левый пульсатор. Для машин с двумя пульсаторами помимо сброса активной среды из ЭК происходит подача пассивной среды низкого давления (ПН) через правый пульсатор. В начале подачи пассивной среды формируется контактная поверхность (КП2). Таким образом, наличие второго пульсатора позволяет организовать подачу и отвод пассивной части рабочего тела. (При одном пульсаторе сжатие и расширение пассивной части рабочего тела происходит в пределах ЭК.) Поскольку часть энергии активной среды отводится (в основном в виде  $Q_0$ ), появляется возможность ввести в систему некоторое количество теплоты  $Q$  в виде полезной холодопроизводительности.

Работа ВКГ в случае с двумя пульсаторами рассмотрена для так называемой петлевой схемы расположения источников и стоков активной и пассивной частей рабочего тела. Данная схема является предпочтительной, так как дает возможность разделить ЭК на теплую и холодную зоны, а также формирует КП2 с противоположных сторон от сброса активного газа (рис. 2) в сток АН, что положительно сказывается на КПД устройства [2]. Тем не менее возможна и прямоточная схема, когда АВ подается с левого пульсатора и сбрасывается с правого, а пассивная среда подается с левого и сбрасывается с правого пульсатора (рис. 3).



*a*



*б*

**Рис. 3. ВКГ с двумя пульсаторами и прямоточной схемой расположения источников и стоков:**

*a* — конструктивная схема; *б* — диаграмма подачи сред

Возможна схема с двумя пульсаторами, но без использования источника пассивной среды низкого давления ПН (рис. 4), так называемый режим температурного разделения потоков среды [1] или делителя потока [2]. В качестве сжимаемой среды в этом случае выступает расширенная активная среда, остающаяся в канале после сброса активной среды в сток низкого давления АН.

Известны более сложные конструктивные схемы ВКГ с большим числом пульсаторов, обеспечивающих ступенчатое сжатие пассивной среды и ступенчатое расширение активной [5], но они не меняют основных принципов организации энергообмена в канале описанных ранее.

В процессе энергообмена в ВКГ кинетическая энергия струи активной части рабочего тела трансформируется в тепловую энергию сжимаемой пассивной части, акустическую, а в некоторых ВКГ (незначительно) в электрическую и механическую энергию. Энтальпия расширенного в устройстве газа при этом понижается, и он охлаждается в большей степени, чем при дросселировании. Для всех ВКГ характерно, что введение в конструкцию второго пульсатора приводит к росту КПД. Это объясняется, тем что активному газу необходимо совершать дополнительную работу выталкивания пассивного газа [6]. Сброс пассивного газа из ЭК, осуществляемый вторым пульсатором, позволяет снизить среднюю температуру пассивного газа в ЭК, что улучшает режим работы ВКГ и также ведет к росту КПД.

По принципу работы пульсатора ВКГ можно разделить на две группы: бесприводные или струйные [7] и с механической системой газораспределения.

К бесприводным ВКГ относятся резонансные охладители газа, пульсационные генераторы холода статического типа, а также резонансные охладители с отводом среды в теплой части ЭК. Все они характеризуются тем, что используемые в них пульсаторы не имеют подвижных частей, что делает их применение особенно целесообразным при криогенных температурах. Резонансные охладители и пульсационные генераторы холода статического типа реализуются по

схеме с одним пульсатором (см. рис. 1, а), а резонансные и пульсационные охладители с отводом среды в теплой части ЭК с двумя (см. рис. 1, б и рис. 4, а). Усовершенствованный вариант пульсационной трубы с дополнительным ресивером и дюзой, разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана [6] представляет собой реализацию схемы с двумя пульсаторами (см. рис. 1, б). В качестве правого пульсатора выступает непосредственно ресиверный объем и дюза.

В результате исследований, проведенных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, было установлено, что доля исключенного из процесса энергопреобразования газа в резонансных ВКГ за один цикл составляет не менее 63 % потока, поступающего в сопло. Это связано с недостатками работы резонансного пульсатора, в котором хотя подача АВ происходит и непрерывно, но на второй фазе рабочего процесса подаваемый в сопло активный газ не участвует в энергообмене (рис. 2, а). Пульсационные генераторы холода статического типа лишены этого недостатка и, как следствие, имеют более высокий КПД.

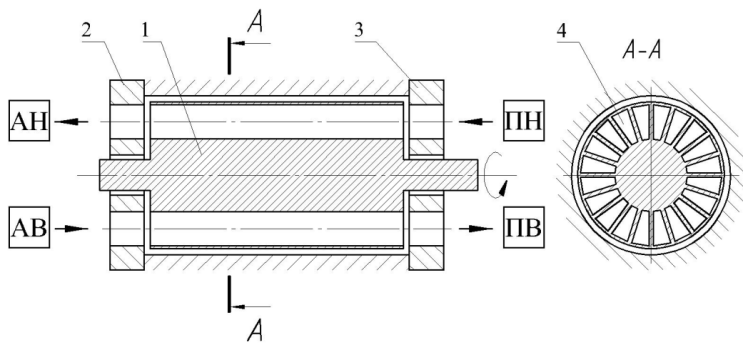
Особый интерес представляют исследования резонансных охладителей с импульсной трубкой переменного сечения, представленные в диссертации В.Л. Бондаренко [1], а именно с эллипсоидной и параболоидной рабочими камерами. Идея улучшения характеристик путем изменения геометрии трубки(канала) универсальна и может быть применена для любого ВКГ. Это подтверждается исследованиями ООО “Газпром ВНИИГАЗ” [8] и “Мицубиси Дзюкоге К.К”, применившими конические каналы для волнового детандера и пульсационного газоохладителя соответственно.

Наличие механического пульсатора позволяет уменьшить смешение активной и пассивной сред и обеспечить более точную организацию фаз рабочего процесса, поэтому КПД ВКГ с механическим



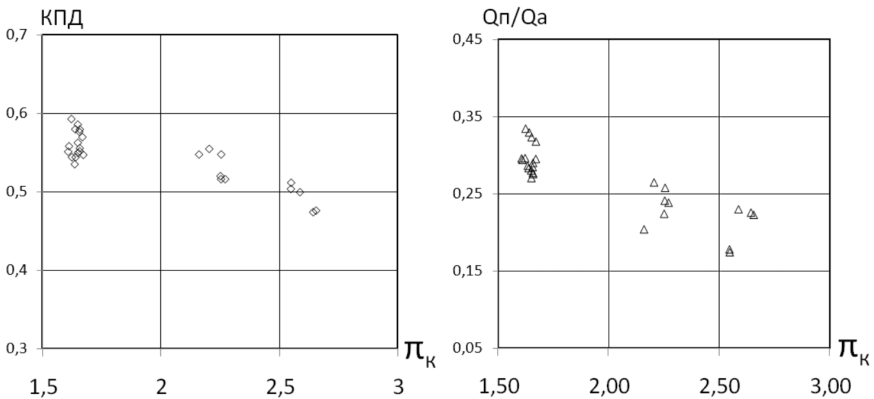
**Рис. 4. Конструктивная схема делителя потока:**

А(П)В — сжимаемый активный газ, оставшийся в канале после сброса активной среды в сток АН



**Рис. 5. Основные конструктивные элементы роторного ВКГ:**

1 — ротор; 2 — газораспределительный диск активной среды; 3 — распределительный диск пассивной среды; 4 — энергообменные каналы



**Рис. 6. Экспериментальные данные влияния степени расширения активного потока  $\pi_k$  на адиабатный КПД РВКГ (а) и относительный расход  $Q_p/Q_a$  (б) ( $Q_p$  и  $Q_a$  — расходы пассивного и активного потоков)**

пульсатором больше, чем у бесприводных. К волновым газорасширительным машинам с механическим пульсатором относятся: ПОГ с механической системой газораспределения, полустатические обменники давления, энергообменники, волновые детандеры и РВКГ (криогенный волновой детандер-компрессор [9]).

Наиболее совершенным и перспективным на сегодняшний день с точки зрения организации энергообмена ВКГ является РВКГ, так как он работает по схеме с двумя пульсаторами и использует эффективный механический (роторный) пульсатор-газораспределитель (рис. 5). Достигнутый изоэнтропный КПД охлаждения газа в РВКГ находится на уровне 0,6–0,5 (рис. 6, а) при соответствующих степенях расширения 1,6–2,6 при температуре активного газа (метан) низкого давления 180–210 К [9]. Расход пассивного газа составляет 20... 35% объема расширенного газа (рис. 5, б). Давление сжатого пассивного газа равно давлению активного газа на входе в РВКГ, что позволяет легко

использовать сжатый пассивный газ в циклах криогенных установок. РВКГ имеет простую конструкцию (частота вращения ротора всего 2000–6000 об/мин), не требует сложных технологий при изготовлении и техническом обслуживании. Все это вместе с невысокой стоимостью РВКГ позволяет использовать каскад таких машин, уменьшая степень расширения в отдельной машине и повышая тем самым КПД всего каскада.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондаренко В. Л. Создание и исследование волновых криогенераторов и их применение в технологии получения неона высокой чистоты: Дис... д-ра техн. наук. – М., 2003. – 294 с.
2. Козлов А. В. Повышение эффективности эксплуатации волновых детандеров в установках низкотемпературной обработки углеводородного газа. Дис... канд. техн. наук: 05.02.13. – М., 2003. – 157 с.
3. Sprenger H. S. Uber thermische Tfermt in Resonanzrohren Vitteilungen aus dem Institut fur Aerodynamik E.T.H. – Zurich, 1954. – No. 21. – S. 18–35.
4. Arharov A. M., Dondarenko V. L., Pronko V. G., Krakovsky B. D. et al. U.S. patent No. 4444019, (April 24, 1984).
5. Уэтерстон Р., Герцберг А. Энергообменник – новая концепция в теории высокоэффективных газотурбинных циклов // Энергетические машины. – 1966. – Т. 4, № 2. – С. 48–62.
6. Микулин Е. И., Ананьев В. В., Первак С. Д., Тарасов А. А., Шевцов А. В., Кононенко Е. В. Результаты исследования криогенного пульсационного рефрижератора-ожижителя в диапазоне температур 40... 110 К // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 1993. – № 3. – С. 77–80.
7. Архаров А. М., Бондаренко В. Л., Симоненко Ю. М. Систематизация пульсаторов, используемых для привода газодинамических аппаратов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. – 2010. – Спец. выпуск. – С. 97–110.
8. Козлов А. В., Бобров Д. М., Лаухин Ю. А. Волновой детандер с энергообменными каналами переменной площади сечения // Химическое и нефтяное машиностроение. – 2000. – № 11. – С. 27–29.
9. Семенов В. Ю., Лаухин Ю. А., Козлов А. В., Малахов С. Б., Левдик Г. Н., Прокшин М. Ю. Результаты экспериментальных исследований криогенного волнового детандер-компрессора // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2009. – № 4. – С. 23–25.

Статья поступила в редакцию 1.10.2012