

*А.М. Архаров, д-р техн. наук, член редколлегии журнала,
В.Ю. Семенов, канд. техн. наук, С.Б. Малахов (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия);
А.И. Савицкий, канд. техн. наук (ПК НПФ «ЭКИП», г. Москва, Россия)*

Анализ рабочих процессов в роторном волновом криогенераторе



Алексей Михайлович Архаров—

академик Российской академии естественных наук, Международной академии холода, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Холодильная, криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный инженер России, лауреат Государственных премий СССР и России, лауреат премии Правительства РФ

В настоящее время наиболее совершенным и перспективным волновым криогенератором является роторный волновой криогенератор (РВКГ), работающий по схеме энергообмена с двумя пульсаторами и с применением эффективного механического (роторного) пульсатора-газораспределителя [1]. Для описания его работы используются понятия «активная» среда (газ) — среда, расширяемая в РВКГ, и «пассивная» среда (газ) — среда, сжимаемая (нагреваемая) в канале РВКГ за счет энергообмена с «активной» средой.

Достигнутый изоэнтропный КПД охлаждения газа в РВКГ — 0,5–0,6 при соответствующих степенях расширения $\pi_k = 2,6\text{--}1,6$ и температуре активного газа (метан) низкого давления 180–210 К [2]. Расход пассивного газа составляет 20–35 % от расхода активного газа. Давление сжатого пассивного газа близко к давлению активного газа на входе в РВКГ, что позволяет упростить схемы реальных криогенных установок. Частота вращения ротора 2000–6000 об/мин. Конструкция РВКГ проста в изготовлении и техническом обслуживании (**рис. 1**).

По мнению авторов исследованный тип криогенераторов представляет большой практический интерес. Статья имеет прямое отношение к проблеме поиска оптимальных технологических схем охлаждения природного газа [3].

Рабочие процессы в РВКГ имеют единую основу с процессами, происходящими в энергообменниках, волновых криогенераторах и пульсационных трубках. Их характеризует разрывность течений и неравновесность. В работах [4–7] сформулирована математическая модель для расчета энергообменников. Эта модель в дальнейшем была доработана

с учетом экспериментального материала специалистами ВНИИГАЗа и применена для расчета так называемых волновых детандеров [8].

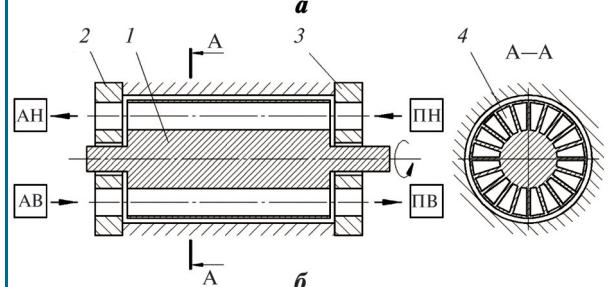


Рис. 1. Роторный волновой криогенератор (а): и схема его основных конструктивных элементов (б):
АВ — активная среда высокого давления; **АН** — активная среда низкого давления; **ПВ** — пассивная среда высокого давления; **ПН** — пассивная среда низкого давления;
1 — ротор;
2 — газораспределительный диск активной среды;
3 — газораспределительный диск пассивной среды;
4 — энергообменные каналы

Одномерное нестационарное течение среды в каналах ротора описывается системой дифференциальных уравнений, выражающих законы сохранения массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (1)$$

импульса

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(P + \rho u^2)}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

и энергии

$$\frac{\partial(\varepsilon + u^2/2)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u(\varepsilon + u^2/2) + P u)}{\partial x} = 0. \quad (3)$$

В систему уравнений (1)–(3) входят четыре исключимые функции: ρ — плотность; u — скорость; P — давление; ε — внутренняя энергия среды. Поэтому система уравнений дополнена уравнением состояния

$$\varepsilon = \frac{P + \chi P_0}{(\chi - 1)\rho}, \quad (4)$$

где χ — показатель адиабаты; P_0 — корректирующий коэффициент (для идеального газа он равен нулю).

Решение системы — распределение параметров на плоскости x, t в области, протяженность которой по оси x равна длине канала.

При решении системы уравнений в начальный момент времени энергообменный канал разбивается на определенное число расчетных ячеек, в каждой из которых задано начальное распределение параметров. На следующем временном шаге в канал поступает газ. Согласно методу [4] расчет параметров рабочего тела в расчетных ячейках осуществляется в два этапа.

На первом этапе из решения задачи о «распаде разрыва» по параметрам каждой пары смежных ячеек определяются параметры на границах между ними и далее — потоки массы, импульса и энергии. Используется система уравнений (1)–(4). Метод «распада разрыва» основан на анализе конфигурации, возникающей на условной границе между расчетными ячейками: ударная волна и волна разрежения, две ударные волны, две волны разрежения [4]. Решение задачи «распада разрыва» в явном виде невозможно, поэтому применяются численные методы.

На втором этапе определяются параметры в расчетных ячейках на следующем временном шаге. Величина шага по времени определяется из соотношения Куранта с использованием коэффициента запаса устойчивости.

Расчет проводится по уравнениям:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} + \delta_i + \delta_c = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{A} \frac{\partial(\rho u^2 A)}{\partial x} + \xi \rho \frac{u|u|}{2D} + \delta_i U_i + \delta_c U_c = 0; \quad (6)$$

$$\frac{\partial \left(\varepsilon + u^2/2 \right)}{\partial t} + \frac{1}{A} \left[\frac{\partial(\rho u A (\varepsilon + u^2/2))}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u A)}{\partial x} \right] + \\ + \delta_i \left(\varepsilon_i + \frac{P_i}{\rho_i} + \frac{U_i^2}{2} \right) + \delta_c \left(\varepsilon_c + \frac{P_c}{\rho_c} + \frac{U_c^2}{2} \right) = 0, \quad (7)$$

где A — площадь поперечного сечения энергообменного канала; индексы « i » и « c » — обозначают источник и сток; u, U_i, U_c — скорости, P, P_i и P_c — давления, $\varepsilon, \varepsilon_i$ и ε_c — внутренние энергии соответственно основной среды, источников и стоков; D — гидравлический диаметр энергообменного канала; ζ — коэффициент гидравлических потерь; δ_i, δ_c — «интенсивности» потока соответственно источников и стоков.

Для проведения расчета уравнения (5)–(7) записывают в разностной форме, дополняя уравнением состояния (4).

Отличительная особенность представляющей модели для расчета РВКГ — применение уравнения состояния для чистого метана с виртуальными коэффициентами [9] не только для расчета интегральных характеристик расхода и температуры, но и непосредственно в методе [4] («распада разрыва»). Примененный в [4] итерационный метод Ньютона для нахождения давления на разрыве среды заменен на более совершенный метод Левенберга-Марквардта. Учет скорости газа в источниках и стоках при определении времени итерации совместно с осреднением параметров газа в расчетной ячейке (используемом в методе «распада разрыва») позволяет моделировать зону смешения при подаче газа в канал. Такой подход более универсален по сравнению с использованием регрессионной зависимости [6]. В модели учитываются влияние перетечек в зазорах и гидравлическое сопротивление в канале. Теплообмен газа со стенками энергообменного канала не учитывается.

На границах энергообменного канала задаются граничные условия в зависимости от положения канала относительно сопел (окон газораспределителей). Используются два типа условий: на непроницаемой стенке и на открытом канале.

Условие на непроницаемой стенке используется при полностью закрытом канале, а также при его открытии и закрытии (с учетом площади закрытого сечения). Параметры (давление, плотность, скорость) на непроницаемой стенке задаются равными параметрам в прилегающей расчетной ячейке, у скорости меняется знак. Параметры источника или стока определяются решением задачи «распада разрыва».

Условие на открытом канале используется для полностью открытого канала и частично открытого канала (с учетом площади открытого сечения канала). Параметры открытого канала задаются равными параметрам в сопле, сообщающимся с каналом в данный расчетный момент. Скорость задается равной скорости газа в прилегающей расчетной ячейке.

Параметры источника или стока также определяются решением задачи «распада разрыва».

В предлагаемой модели для учета свойств реального газа в методе «распада разрыва» используется коррекция вычислений по более точному уравнению со-

стояния с виртуальными коэффициентами [9] с помощью переменной P_0 . Например, при вычислении внутренней энергии переменная P_0 определяется из условия равенства результатов уравнения (4) и уравнения с виртуальными коэффициентами. По такому принципу был введен учет реальных свойств газа во все вычисления параметров среды при решении задачи «распада разрыва», в том числе и в «условия непрерывности римановых инвариантов» (система уравнений, применяемая для определения параметров газа на разрыве при возникновении волн разрежения). Полученные результаты математического моделирования представлены на рис. 2–5.

На основе проведенного моделирования рабочий цикл РВКГ упрощенно можно описать следующим образом. В угловом положении 1A–4A канал ротора сообщается с соплом подачи активного газа высокого давления (AB), и активный газ высокого давления (давление $P_{1\text{акт}}$, температура $T_{1\text{акт}}$) подается в канал ротора. В начальный момент формируется фронт ударной волны 1, двигающийся к торцу пассивного газораспределителя (см. рис. 2, 3). Торможение ударной волны 1 на стенке пассивного газораспределителя вызывает рост давления до p_1 (см. рис. 4). В угловом положении 1P–4P через сопло (ПВ) сбрасывается пассивный газ (давление $P_{1\text{пас}}$, температура $T_{1\text{пас}}$). При отсечении канала от сопла ПВ (углы 3P–4P) возникает волна торможения 1, и давление возрастает до p_2 . Далее происходит отражение ударной волны 1 и волны торможения 1 от стенок газораспределителей ($p_1-p_{1a}-p_{1b}-p_{1v}$ и $p_2-p_{2a}-p_{2b}-p_{2v}$). При сбросе активного газа в сопло (АН) с давлением $P_{3\text{акт}}$ формируется волна разряжения 3 (углы 5A–6A), которая, двигаясь к торцу пассивного газораспределителя, снижает давление до p_3 (углы 5P–6P), обеспечивая подачу пассивного газа низкого давления из сопла (ПН) с давлением $P_{3\text{пас}}$ и температурой $T_{3\text{пас}}$ в канал. Отражение возникающих волн ведет к существенным колебаниям скоростей газа на углах 5A–8A и 5P–8P. После второй фазы колебания параметров еще некоторое время затухают и могут оказывать влияние на работу следующего цикла, что ограничивает количество циклов за один оборот ротора.

Индикаторная диаграмма РВКГ. Упрощенная математическая модель

Для изучения процессов в РВКГ использован опыт построения индикаторной диаграммы для известной машины Гиффорда-Мак-Магона с газовым поршнем, а также детандера с газовым поршнем [10]. На основе результатов, полученных по математической модели, использующей метод «распада разрыва», была построена индикаторная диаграмма (см. рис. 5). Ось абсцисс соответствует относительному расположению контактной поверхности, условно разделяющей активный и пассивный газы. Положе-

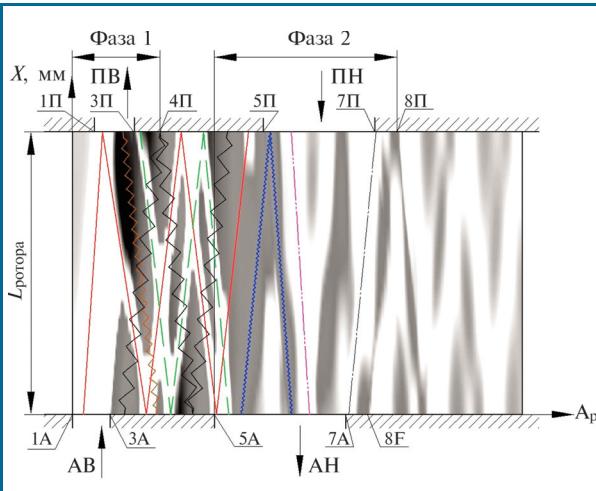


Рис. 2. Расчетная волновая картина энергообмена в РВКГ ($\pi_k = 2,16$):

АВ, АН — активный поток высокого и низкого давления; ПВ, ПН — пассивный поток высокого и низкого давления; A_p — угловое положение ротора, град; — ударная волна 1; — волна торможения 1; — волна торможения 2; — волна разрежения 1; — волна разрежения 3; — волна разрежения 2;

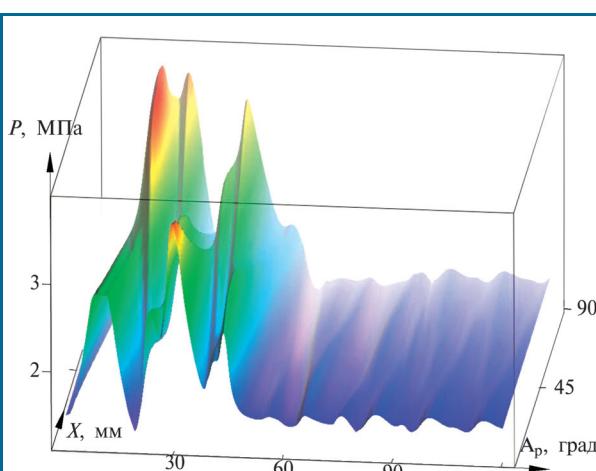


Рис. 3. Расчетное распределение давления по длине канала (ось X) в зависимости от углового положения ротора ($\pi_k = 2,16$):

A_p — угловое положение ротора, град

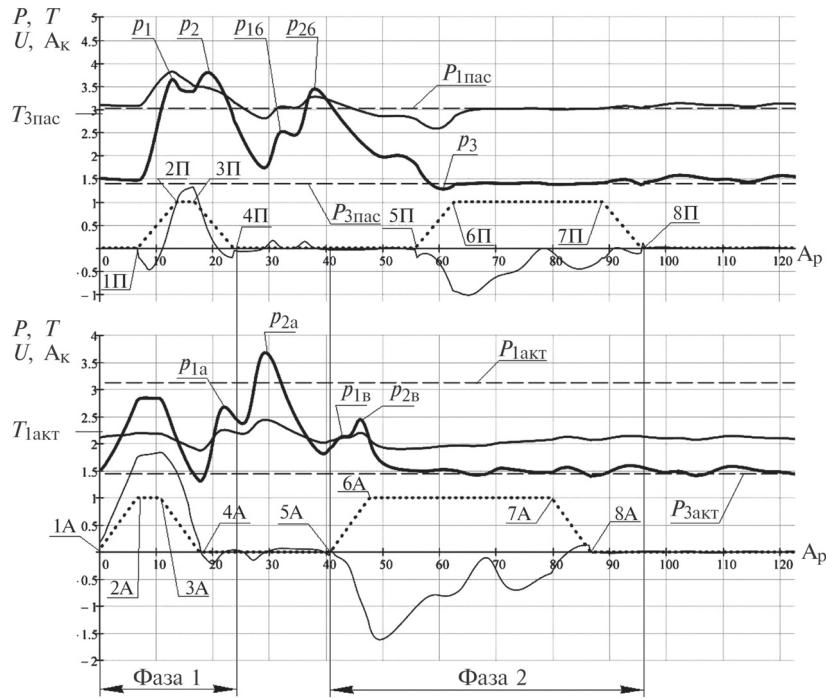


Рис. 4. Расчетные значения давления, температуры, скорости газа(метана) в крайних расчетных ячейках канала ротора со стороны активного газораспределителя (снизу) и со стороны пассивного газораспределителя (сверху) ($\pi_k = 2,16$):

— давление P , МПа;
— температура T , К/100;
— скорость U , (м/с)/100;
••• доля раскрытия канала A_k , %/100;
 A_p — угол поворота ротора
(1–8А и 1–8П — основные углы), град

ние контактной поверхности определялось исходя из массы подаваемого и сбрасываемого из канала активного газа. Ось ординат соответствует средним давлениям активного и пассивного газов, рассчитанным по параметрам в расчетных ячейках.

Подача активного газа высокого давления в канал сопровождается ростом среднего давления газа в канале на углах 1А–2А и последующим падением до $P_{2\text{акт}}$ на углах 2А–5А, что объясняется сбросом пассивного газа на углах 1П–4П (см. рис. 5). На углах 4П–5А при закрытом канале с обоих торцов на-

ближаются существенные колебания средних параметров активного и пассивного газов (зона Z), связанные с наличием остающейся в энергообменном канале после фазы 1 рабочего процесса части пассивного газа — так называемой «газовой пробки».

Сброс активного газа в сопло АН на углах 5А–8А начинается с незначительного подъема давления (в связи с приходом отраженных ударной волны 1 и волны торможения 1, см. рис. 4); в дальнейшем давление снижается, и колеблется около значения $P_{3\text{акт}}$.

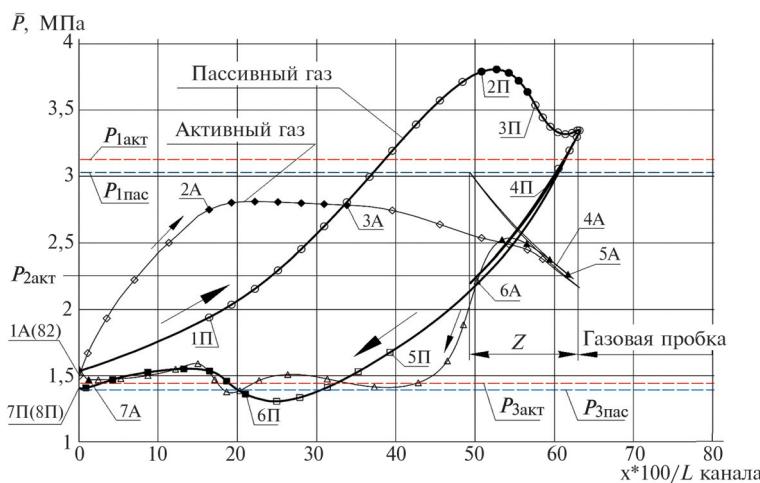


Рис. 5. Расчетная индикаторная диаграмма ($\pi_k = 2,16$):

подача активного газа:

◆ — при полностью открытом канале,
◇ — при открытии/закрытии канала;
сброс активного газа:

△ — при полностью открытом канале,
▲ — при открытии/закрытии канала;

сброс пассивного газа:
● — при полностью открытом канале,
○ — при открытии/закрытии канала;

подача пассивного газа:

■ — при полностью открытом канале,

□ — при открытии/закрытии канала;

1А–8А, 1П–8П — основные углы положения ротора со стороны активного и пассивного газораспределителя соответственно

На основе полученной индикаторной диаграммы можно выделить основные процессы изменения параметров активного и пассивного газов, происходящие в энергообменном канале. Расширение активного газа на фазе 1 относительно первоначального давления $P_{1\text{акт}}$ в сопле до давления $P_{2\text{акт}}$ (см. рис. 5) происходит при впуске газа в канал (углы 1А–4А) и в процессе выхлопа (углы 1П–4П), где активный газ является газом, остающимся в «баллоне» [11], а в роли газа, вышедшего из «баллона», выступает пассивный газ. Поэтому процесс расширения активного газа с давления $P_{1\text{акт}}$ до $P_{2\text{акт}}$ с большой точностью можно считать изоэнтропным.

Вторая ступень расширения активного газа с давления $P_{2\text{акт}}$ до $P_{3\text{акт}}$ на углах 5А–8А — процесс выхлопа. Так как при этом подаваемый пассивный газ на углах 5П–8П полностью заменяет активную среду в канале, то температуру выходного активного газа можно вычислить по зависимости для выхлопа с учетом смешения оставшегося в «баллоне» и вышедшего газа:

$$T_{3\text{акт}} = \frac{T_{2\text{акт}} \left(1 + \frac{P_{3\text{акт}}}{P_{2\text{акт}}} \right)}{k}, \quad (8)$$

где $T_{2\text{акт}}$, $P_{2\text{акт}}$ — начальные температура и давление активного газа; $T_{3\text{акт}}$, $P_{3\text{акт}}$ — температура и давле-

ние активного газа после выхлопа; k — показатель адиабаты.

Температуру пассивного газа $T_{1\text{пас}}$ можно определить по его энталпии $h_{1\text{пас}}$, определенной в предположении, что энергия, вырабатываемая активным газом при его расширении с давления $P_{1\text{акт}}$ до давления $P_{2\text{акт}}$, полностью передается пассивному газу на фазе 1 энергообмена. Изменение параметров пассивного газа при его впуске в канал (углы 5П–8П) на фазе 2 энергообмена крайне незначительно и может не учитываться.

$$h_{1\text{пас}} = \frac{h_{1\text{акт}}(P_{1\text{акт}}, T_{1\text{акт}}) - h_{2\text{акт}}(P_{2\text{акт}}, T_{2\text{акт}})}{\rho_{3\text{пас}}(P_{3\text{пас}}, T_{3\text{пас}})/\rho_{2\text{акт}}(P_{2\text{акт}}, T_{2\text{акт}})} + h_{3\text{пас}}(P_{3\text{пас}}, T_{3\text{пас}}), \quad (9)$$

где $h_{1\text{акт}}$, $h_{2\text{акт}}$, $h_{1\text{пас}}$ — энталпии; $\rho_{2\text{акт}}$, $\rho_{3\text{пас}}$ — плотности.

Для вычисления $T_{1\text{пас}}$ и $T_{3\text{акт}}$, помимо параметров газов подаваемых в РВКГ ($P_{1\text{акт}}$, $T_{1\text{акт}}$ и $P_{3\text{пас}}$, $T_{3\text{пас}}$), необходимо определить давление $P_{2\text{акт}}$. На всех режимах исследуемого РВКГ давление $P_{2\text{акт}}$ приблизительно равнялось половине всего интервала $P_{1\text{акт}}-P_{3\text{акт}}$ [2]. Температуры $T_{3\text{акт}}$ и $T_{1\text{пас}}$, вычисленные с использованием формул (8) и (9), позволяют определить характеристики идеального

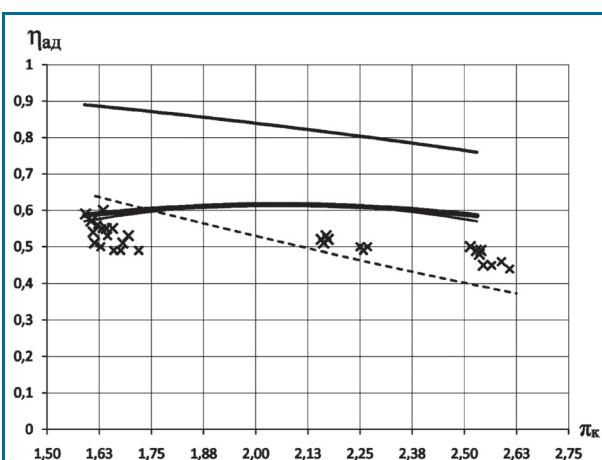


Рис. 6. Сравнение зависимостей экспериментальных и расчетных величин адиабатного КПД от степени расширения активного потока π_k :

— расчет по математической модели на основе распада разрыва; — расчет по упрощенной математической модели без учета смешения газов; — расчет по упрощенной математической модели с учетом смешения газов; — расчет по уравнению для выхлопа

$$T_{3\text{акт}} = \frac{T_{1\text{акт}} \left(1 + \frac{P_{3\text{акт}}(k-1)}{P_{1\text{акт}}} \right)}{k}; \times — \text{экспериментальные данные}$$

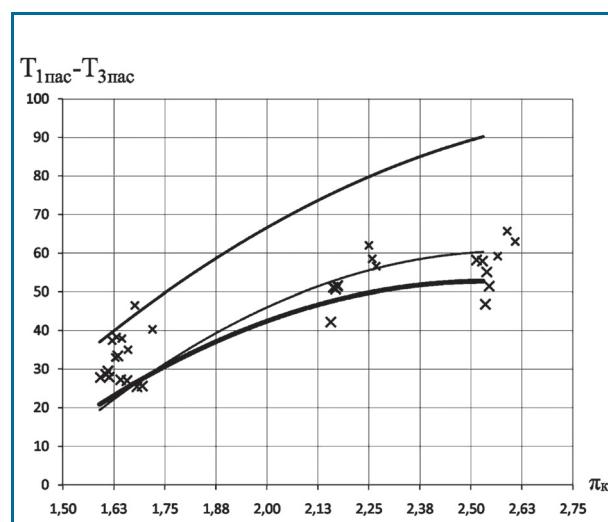


Рис. 7. Сравнение зависимостей экспериментальных и расчетных величин перепада температур пассивного газа от степени расширения активного потока π_k :

— расчет по математической модели на основе распада разрыва; — расчет по упрощенной математической модели без учета смешения газов; — расчет по упрощенной математической модели с учетом смешения газов; \times — экспериментальные данные

РВКГ (без смешения газов). Результаты расчетов по упрощенной модели с учетом смешения (8,5 %) и без учета представлены на рис. 6 и 7. Расхождение результатов вычислений по упрощенной модели со смешением и модели, использующей «распад разрыва», объясняется отсутствием учета влияния «газовой пробки» в формуле (9) и использованием зависимости (8), полученной для идеального газа (остальные вычисления проведены по уравнению состояния для чистого метана [9]).

Необходимо отметить, что колебания полученных экспериментальных данных (см. рис. 6 и 7) связаны не только со степенью расширения π_k , но и с нестабильностью других параметров.

Выводы

Погрешность результатов расчетов по классическим уравнениям для процесса выхлопа и по методу «распада разрыва» [4] в сравнении с экспериментальными данными не превышает 4 %, что подтверждает их применимость для расчета параметров РВКГ в исследованном диапазоне степеней расширения.

Расчеты по упрощенной модели позволяют сделать вывод о существенной роли процессов смешения активного и пассивного газов на снижение эффективности РВКГ.

Выявлены основные процессы и фазы в РВКГ. На фазе 1 активный газ расширяется изоэнтропно, на фазе 2 происходит его выхлоп со смешением. Сжатие и нагрев пассивного газа происходят на фазе 1 рабочего процесса.

Существует возможность увеличения производительности исследуемой конструкции РВКГ за счет уменьшения или устранения «газовой пробки» путем коррекции углов сопел газорапределителей и увеличения заполнения канала.

Список литературы

1. Архаров А.М., Семенов В.Ю., Малахов С.Б. Анализ принципов организации энергообмена в волновых криогенераторах. Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2012. 286 с. 2. Семенов В.Ю., Лаухин Ю.А., Козлов А.В. и др. Результаты экспериментальных исследований криогенного волнового детандер-компрессора // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 4. С. 23–25.
3. Архаров А.М., Архаров И.А., Шевич Ю.А., Семенов В.Ю., Лавров Н.А., Красноносова С.Д., Колобова А.Н. Энтропийно-статистический анализ установок малой производительности для оживления природного газа с содержанием метана 92 % // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2012. № 4. С. 19–32.
4. Годунов С.К. Численное решение многомерных задач газовой динамики М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука». 1976. 400 с.
5. Мунштуков Д.А., Эрсамбетов В.Ш. Влияние краевых условий на потоки масс в волновом преобразователе энергии // Двигатели внутреннего сгорания, 1986, № 43. С. 81–86.
6. Мунштуков Д.А. Эрсамбетов В.Ш. Использование метода газогидроаналогии для исследования входа среды в канал ротора волнового обменника давления // Харьковский авиационный институт. 1986. 34 с.
7. Эрсамбетов В.Ш. Совершенствование модели процесса и исследование режимов работы волнового обменника давления, предназначенного для наддува дизеля // Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Харьков. 1988. 26 с.
8. Эрсамбетов В.Ш., Лаухин Ю.А., Бобров Д.М. и др. Результаты численных и экспериментальных исследований волнового детандера // Химическое и нефтяное машиностроение. 1996. № 5. С. 14–16.
9. Загорученко В.А., Журавлев А.М. Теплофизические свойства газообразного и жидкого метана. М.: Изд-во комитета стандартов, мер и измерительных приборов при совете министров СССР. 1969. 236 с.
10. Панкова Е.О. Разработка и исследование детандера с газовым поршнем: Дисс. ... канд. техн. наук. М., 1987. 149 с.
11. Архаров А.М. Криогенные системы: Учебник для студентов вузов по специальности «Техника и физика низких температур» в 2 т. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1996. Т. 1. Основы теории и расчета. 2006. 576 с.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ ЖУРНАЛА «ХИМИЧЕСКОЕ И НЕФТЕГАЗОВОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

Напоминаем, что авторам статей, включенных в переводное издание журнала, выпускаемое в США под названием Chemical and Petroleum Engineering, выплачивается гонорар с октября следующего года (после публикации статьи) в течение трех лет.

Для получения гонорара необходимо заполнить справку-заявление и выслать по адресу:
123995, Россия, г. Москва, ГСП-5, Б. Бронная, д. 6а, строение 1, Российское авторское общество (РАО)

Форма справки-заявления

1. Фамилия, имя, отчество
2. Дата рождения
3. Паспортные данные (серия, номер паспорта, кем и когда выдан)
4. Адрес по месту прописки с почтовым индексом
5. Рабочий и домашний телефоны, номер факса
6. Список опубликованных статей (указать название журнала, год издания, номер журнала, страницы), в которых Вы являетесь автором или одним из соавторов
7. Причитывающуюся мне сумму гонорара прошу выплатить... (пункт 7 следует согласовать с РАО)

Телефоны РАО: (495) 697-06-68, 697-33-35, 697-54-86; факс: (495) 609-93-63

E-mail: piterkina@rao.ru