

Э. И. Зангиров, М. В. Мухаметов, А. В. Свистунов, А. А. Чиндина

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВИХРЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ГАЗОВ

Рассматривается актуальная проблема получения рабочей характеристики квазиизотермического вихревого регулятора давления газов. Приведены результаты численного и физического моделирования. Представлены результаты их анализа и вывод линеаризованного рабочего уравнения регулятора. *Природный газ; вихревая труба; дросселирование; математическая модель; экспериментальные исследования; численное моделирование*

ВВЕДЕНИЕ

Повышение энергетической эффективности трубопроводных систем распределения и транспортировки природного газа является приоритетным направлением развития энергетики и энергетической эффективности промышленности Российской Федерации и входит в перечень критических технологий, определяющих процесс создания энергосберегающих систем транспортировки, распределения и потребления энергетических ресурсов.

При дросселировании газа происходит снижение его температуры, что приводит к отложению твердых кристаллогидратов в проточной части дросселирующей аппаратуры (регуляторов давления газа), вследствие чего она перестает работать, что может привести к созданию аварийных ситуаций и полной остановке газораспределительной станции (ГРС).

Для проектирования дросселирующих устройств с применением современных технологий вычислительной техники необходима разработка математической модели, описывающей газодинамические и термодинамические процессы, происходящие в газовых потоках, а также построение рабочей характеристики, позволяющей прогнозировать работу устройства на всех режимах.

Процесс дросселирования газа в вихревой трубе, исследуемый с 1937 г., обладает рядом особенностей. Рассмотрены и проанализированы научные труды, публикации, результаты

исследований, посвященные проблемам изучения и практического применения устройств, реализующих вихревой эффект таких ученых, как В. С. Мартыновский, В. П. Алексеев, А. П. Меркулов, А. И. Леонтьев, Ш. А. Пиралишвили, Ю. Д. Райский, Л. Е. Тункель, В. М. Бродянский, А. Д. Суслов, Р. Я. Амиров, Р. Х. Мухутдинов, М. А. Жидков, А. М. Русак, Ю. М. Ахметов, В. А. Целищев, С. В. Гурин, А. А. Соловьев, А. Ю. Пархимович, из зарубежных современных исследователей вихревого эффекта можно выделить Шепера (Scheper G. V.), Ван Димтера (Van Deemter J. J.), Такахама (Takahama H.) и др.

В работах указанных авторов рассматривались процессы в вихревых устройствах (рис. 1), предусматривающих температурное разделение (температурную стратификацию) потока газа [1].

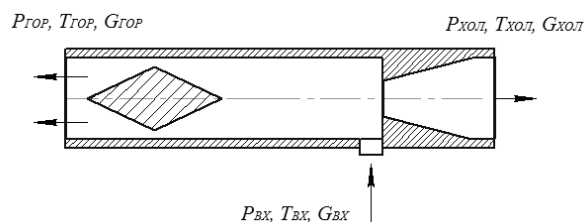


Рис. 1. Противоточная вихревая труба

В вихревую трубу поток газа подается с параметрами $P_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}$. В результате снижения давления газ перейдет в состояние с параметрами $P_{\text{дт}}, T_{\text{дт}}$. Дросселирование исходного потока в вихревой трубе позволяет получить на выходе поток газа с параметрами нагретого потока $P_{\text{гор}}, T_{\text{гор}}$ и массовым расходом $G_{\text{гор}}$ и охлажденного потока $P_{\text{хол}}, T_{\text{хол}}$ с массовым расходом $G_{\text{хол}}$. Полученные в результате прохождения вихревой трубы параметры газа значительно отличаются от параметров газа, полученных после прохождения им дросселирующих устройств (снижение и повышение температуры соответственно). При

Контактная информация: 8 (347) 273-09-44

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.0337 «Научное обоснование, создание и исследование энергосберегающих вихревых технологий фазоразделения, подогрева и редуцирования при транспортировке попутного и природного газа».

смешении истекающих из трубы потоков газа логично получение потока газа с параметрами $P_{ДТ}, T_{ДТ}$, однако, как было показано в работах Ю. М. Ахметова и С. В. Гурина, существует область, в которой возможна реализация квазиизотермического процесса дросселирования.

В противоточной вихревой трубе с внешним смешением потоков (рис. 2) массовый расход газа на выходе $G_{ВЫХ} = G_{ГОР} + G_{ХОЛ}$ определится как сумма массовых расходов нагретого и охлажденного потоков. Интенсивность энергетического разделения газов в вихревой трубе (вихревой эффект), как известно, оценивают по зависимости избыточных величин температур газа $\Delta T_{ХОЛ} = T_{ВХ}^* - T_{ХОЛ}^*$ и $\Delta T_{ГОР} = T_{ГОР}^* - T_{ВХ}^*$ от доли охлажденного потока $\mu_x = \frac{G_{ХОЛ}}{G_{ВХ}}$ относительно массового расхода на входе $G_{ВХ}$. Доля подогретого потока при этом составит $\mu_r = \frac{G_{ГОР}}{G_{ВХ}} = (1 - \mu_x)$ [2].

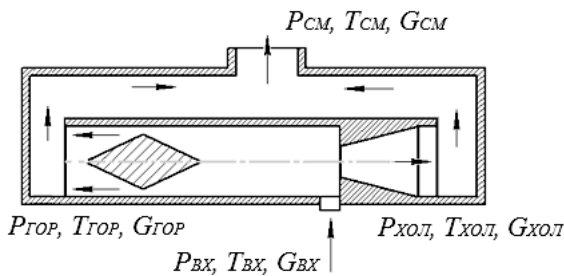


Рис. 2. Противоточная вихревая труба с внешним смешением потоков

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ДРОССЕЛИРОВАНИЯ ГАЗОВ

Исходя из равенства полных удельных энтальпий входящего в вихревую трубу потока газа и суммы истекающих (нагретого и охлажденного) из нее потоков газа, характеристикой квазиизотермического процесса является температура смешанного потока, а также перепад температуры по всей системе смешения потоков после стратификации в вихревой трубе при $c_p = \text{const}$:

$$T_{см}^* = \mu_x \cdot T_{хол}^* + (1 - \mu_x) T_{гор}^* \quad (1)$$

Анализ экспериментальных исследований противоточной вихревой трубы согласно А. П. Меркулову, представленный в виде графика в $P-T$ координатах процесса дросселирования и перераспределения температуры потоков газа после вихревой трубы, изображен на рис. 3 [3].

Сравнительный анализ испытаний вихревых труб [4] позволил выявить зоны, в которых смешевая температура равна входной (зона изотермического дросселирования) либо превышает ее (зона квазиизотермического дросселирования). Качественная зависимость температуры газа по тракту вихревой трубы от доли охлажденного потока газа μ_x представлена на рис. 4.

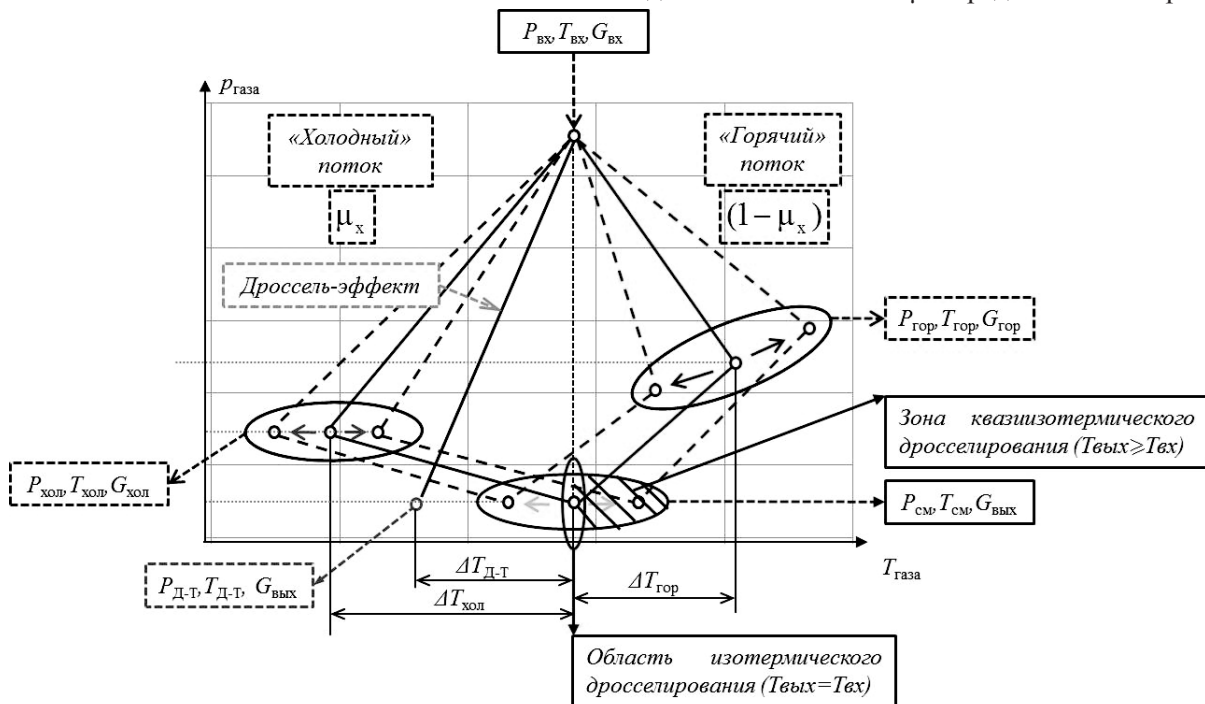


Рис. 3. Принципиальное сравнительное представление в $P-T$ координатах процесса дросселирования давления газа при протекании газа через гидросопротивление (дроссель эффект Джоуля-Томсона) и процесса дросселирования в вихревой трубе с учетом температурной стратификации

Как видно, смесевая температура газа $T_{см}$ на всем участке смешения превышает температуру, полученную при снижении давления газа путем его дросселирования (Дроссель-эффект).

Исследование температурных характеристик, получаемых в результате дросселирования газа в вихревых трубах, подтверждают возможность получения квазиизотермического процесса, для осуществления которого необходимо создание условий интенсивной температурной стратификации входного потока и последующего смешения газа в определенных массовых пропорциях по формуле (1) с максимальным исключением теплообменных процессов между стратифицированным потоком и окружающей средой.

Анализ механизма процесса температурной стратификации в вихревых трубах позволил выявить несоответствие в процессе дросселирования дифференциального дроссель-эффекта (эффекта Джоуля–Томсона) в двух областях: в области потока с низкой температурой и в области потока с высокой температурой. Область, в которой температура потока превышает температуру входа, можно использовать в качестве источника предварительного подогрева для повышения входной температуры. Тогда подогрев входного газа, за счет горячего газа, полученного после стратификации, приводит к тому, что температура газа перед стратификацией непре-

равно повышается, реализуя положительную обратную связь [5].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВРД

На основании проведенного анализа вихревых труб сотрудниками УГАТУ и ОАО «Научно-исследовательский институт технологии» была разработана конструкция и изготовлен экспериментальный образец квазиизотермического регулятора давления газов (КВРД) (твердотельная модель представлена на рис. 5), позволяющий осуществлять дросселирование газа без снижения его температуры [6].

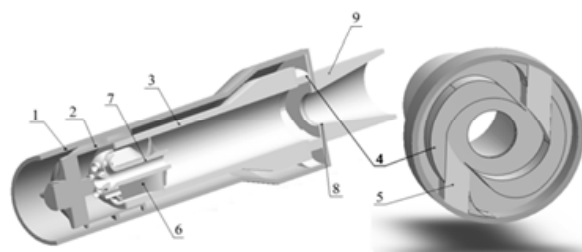


Рис. 5. Твердотельная модель экспериментального образца КВРД:

- 1 – корпус; 2 – винтовая головка; 3 – камера энергетического разделения; 4 – закручивающее устройство (улитка); 5 – регулирующие клинья; 6 – тормозное устройство; 7 – устройство возврата потока; 8 – диафрагма; 9 – диффузор

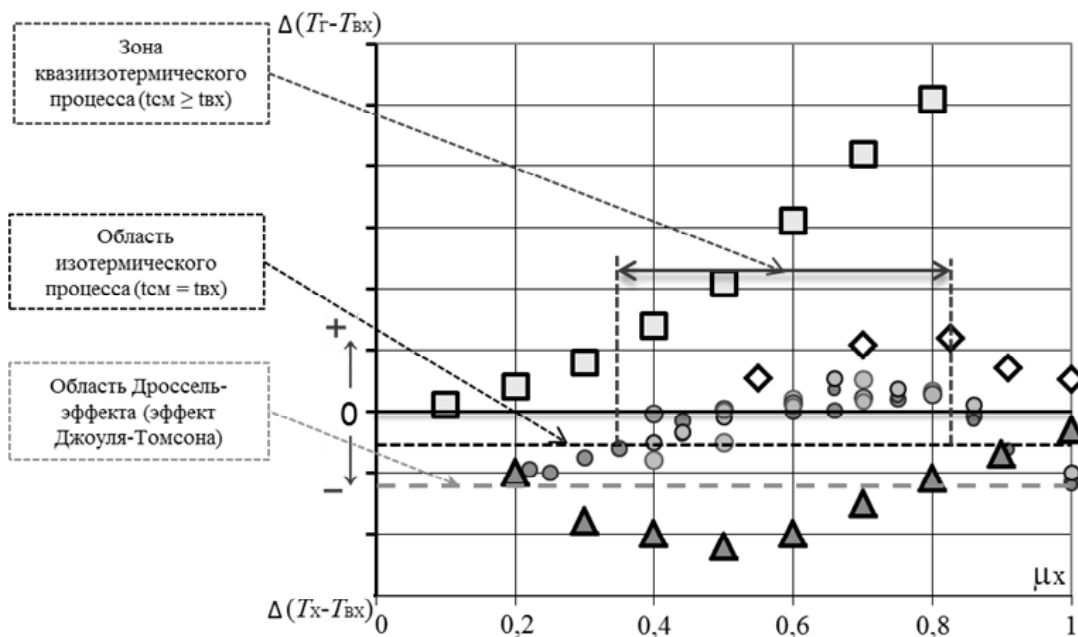


Рис. 4. Результаты испытаний различных вихревых труб:

- ◇ ▲ - согласно экспериментам А. П. Меркулова;
- ○ ● ● ● ● ● - согласно экспериментам Р. Х. Мухутдинова (разное входное давление)

Для прогнозирования работы подобных устройств и их проектирования на уровне современных технологий необходимо получение рабочей характеристики на всем диапазоне их работы (обобщенная рабочая характеристика).

Получение обобщенной рабочей характеристики КВРД осуществляется согласно следующим этапам:

- верификация результатов численного моделирования согласно результатам имеющихся экспериментальных исследований, введение при необходимости поправочных коэффициентов;
- проведение численного моделирования КВРД на всем диапазоне входных и выходных давлений;
- получение обобщенной рабочей характеристики КВРД.

Экспериментальные исследования образца выполнялись в лаборатории «Газодинамика высоких давлений» УГАТУ в 2011 г. В качестве рабочего тела использовался сжатый воздух. Абсолютное входное давление в экспериментах составляло 0,7 МПа. Выходное давление составляло 0,1 МПа. Температура воздуха на входе в регулятор в процессе экспериментов изменялась в интервале 289...278 К.

Схема измерений лабораторного стенда представлена на рис. 6.

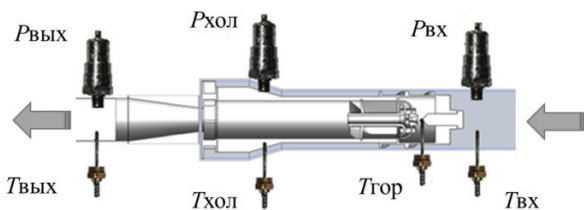


Рис. 6. Базовая схема измерений режимных параметров КВРД:

$P_{\text{вх}}, T_{\text{вх}}$ – давление и температура потока газа на входе в КВРД; $P_{\text{хол}}, T_{\text{хол}}$ – давление и температура потока газа перед закручивающим устройством КВРД; $T_{\text{гор}}$ – температура газа перед устройством возврата потока; $P_{\text{вых}}, T_{\text{вых}}$ – давление и температура потока газа на выходе из КВРД

Экспериментальное исследование, при котором давление входного потока газа составляло 0,7 МПа; давление потока газа на выходе 0,1 МПа; температура входного потока газа изменяется в диапазоне 292,3...277,8 К представлено на рис. 7.

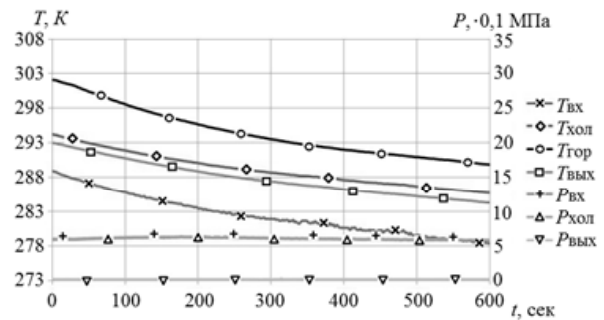


Рис. 7. Экспериментальное исследование КВРД ($P_{\text{вх}} = 0,7$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,1$ МПа)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КВРД

Для проведения численного моделирования использовалась математическая модель, опубликованная ранее [7], с учетом влияния теплообмена в газе и стенках КВРД.

Теплопередача в газе описывается посредством следующей общей формы уравнений сохранения энтальпии:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \cdot (\rho h u_j) = \frac{\partial P}{\partial t} + u_j \frac{\partial P}{\partial t} + \tau_{ij} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (2)$$

где h – статическая энтальпия, определяемая уравнением:

$$h = \bar{c}_p T - c_p^0 T_0, \quad (3)$$

где T – температура; \bar{c}_p – средняя удельная теплоемкость при постоянном давлении для температуры T ; c_p^0 – удельная теплоемкость при постоянном давлении для температуры T_0 .

Основное уравнение для полной энтальпии (H) можно получить сложением уравнения сохранения механической энергии и уравнения статической энтальпии:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j H + u_i \tau_{ij}) = - \frac{\partial p u_j}{\partial x_j}, \quad (4)$$

где $H = \frac{1}{2} \cdot u_i u_i + h$.

Применение уравнения переноса полной энтальпии и тем более статической энтальпии рекомендуется осуществлять для потоков с числами Экерта (Ec) порядка 1,0 и более. Величина этого коэффициента определяется как:

$$Ec = \frac{U^2}{c_p T}, \quad (5)$$

где U – величина характеристической скорости, а T – величина характеристической (абсолютной) температуры.

Наряду с моделированием диффузии тепла в текучей среде (с помощью уравнений Редлиха-

Квонга и Сазерленда), моделируется также теплопередача в твердых телах с помощью уравнения

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q_H, \quad (6)$$

где $e = cT$ – удельная теплоемкость, T – температура, λ_i – теплопроводность, Q_H – удельное (в единице объема) тепловыделение источника тепла.

Конвективный теплообмен между поверхностью твердых тел и текучей средой моделируется при расчете пограничного слоя потока текучей среды. В результате в соответствии с законом Стефана-Больцмана излучаемое с единицы поверхности тепло определяется как

$$Q_H = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot T_w^4, \quad (7)$$

где ε – степень черноты поверхности, σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, T_w – температура поверхности.

Учет влияния теплообмена каждой поверхности позволяет определить (с учетом рассчитываемого фактора видимости) разность между приходящими и уходящими (т.е. отраженными и излучаемыми) тепловыми потоками.

Твердотельная модель расчетной области КВРД для численного моделирования была создана в пакете трехмерного твердотельного моделирования *SolidWorks*.

Расчетная сетка имеет следующие параметры:

- количество ячеек равно 6515776;
- размер минимальной ячейки равен 0,1 мм³;
- размер максимальной ячейки равен 4,8 мм³.

Дополнительно в расчетной сетке, в областях с максимальными градиентами скорости и давления, применялось локальное измельчение сетки. Измельчение использовалось в области за срезом вводного сопла, в области за диафрагмой (рис. 8).

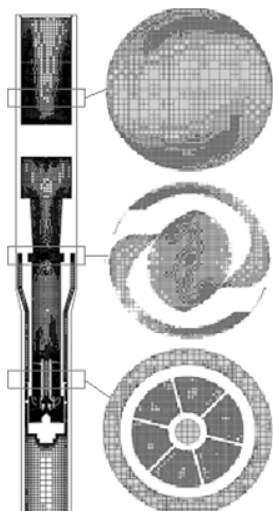


Рис. 8. Расчетная сетка КВРД с локальным измельчением

Случайная погрешность нивелируется количеством измерений и имеет значение на порядок ниже приборной, и по этой причине не учитывается.

Результат численного моделирования позволил визуализировать течение потока газа в наружном и внутреннем контурах КВРД, определить структуру и характер взаимодействия вихревых потоков (рис. 9). Это позволило определить картину теплового взаимодействия внутреннего и внешнего контуров, области подогрева и охлаждения стенок внутреннего контура и определить характер изменения параметров потока газа по тракту регулятора.

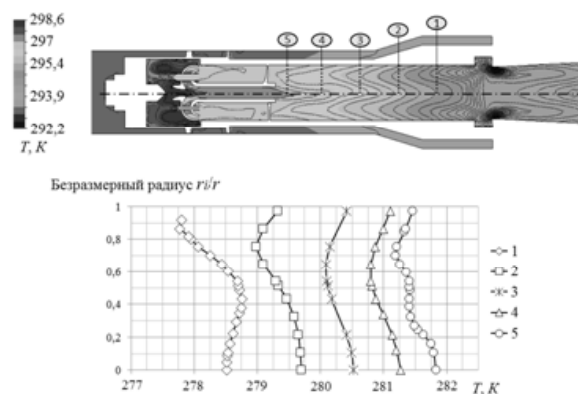


Рис. 9. Результат численного моделирования

Визуализация теплового взаимодействия контуров позволила определить направления теплообмена на различных участках корпуса внутреннего контура. Были четко определены характерные места подогрева и охлаждения внутреннего контура, что позволяет выработать конкретные рекомендации по организации теплообмена по контуру положительной обратной связи для получения квазиизотермических процессов дросселирования давления при проектировании регуляторов.

Результаты численного и физического моделирования представлены в таблице.

Результаты физического и численного моделирования

Результаты физического моделирования						
$T_{вх}, K$	$T_{хол}, K$	$T_{гор}, K$	$T_{вых}, K$	$P_{вх}, MPa$	$P_{хол}, MPa$	$P_{вых}, MPa$
292,2	296,1	301,8	293,3	0,7	0,72	0,1
Результаты численного моделирования						
$T_{вх}, K$	$T_{хол}, K$	$T_{гор}, K$	$T_{вых}, K$			
292,2	293	298,6	291,5			

Сравнительный анализ полученных данных позволил выявить, что сходимость результатов численного и физического эксперимента по составленной математической модели не превышает погрешности 2%.

ЛИНЕАРИЗОВАННАЯ РАБОЧАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КВРД

В результате проведенной идентификации экспериментальных данных по испытаниям КВРД может быть получено математическое описание зависимости температуры газа на выходе регулятора от температуры газа на входе (т.е. $T_{\text{вых}} = f(T_{\text{вх}})$). Для значений барометрических параметров потока газа $P_{\text{вх}} = 0,7$ МПа, $P_{\text{вых}} = 0,1$ МПа уравнение рабочего процесса КВРД будет иметь вид:

$$T_{\text{вых}} = (-0,0043 \cdot (T_{\text{вх}})^2 + 0,0767 \cdot (T_{\text{вх}}) + 0,5223) \times (T_{\text{вх}}) + (0,0363 \cdot (T_{\text{вх}})^2 - 0,5657 \cdot (T_{\text{вх}}) + 9,5545) \quad (3)$$

С учетом изменения барометрических параметров потока газа на входе и выходе КВРД обобщенное уравнение рабочего процесса КВРД $T_{\text{вых}} = f(T_{\text{вх}}, P_{\text{вх}}, P_{\text{вых}})$ может быть представлено в виде:

$$T_{\text{вых}} = [k_1(T_{\text{вх}}) \cdot \Delta T_{\text{вх}} + b_1(T_{\text{вх}})] + [k_2(T_{\text{вх}}; \Delta P) \cdot \Delta P + b_2(T_{\text{вх}})] - k_3 \cdot \Delta P \quad (4)$$

Предлагаемое уравнение учитывает:

- 1) влияние величины температуры на входе в регулятор $T_{\text{вх}}$;
- 2) влияние величины давления на входе в регулятор $P_{\text{вх}}$;
- 3) влияние величины давления на выходе из регулятора $P_{\text{вых}}$;
- 4) влияние величины перепада $\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$ давления на регуляторе;

ВЫВОДЫ

Разработанная математическая модель квазиизотермического вихревого регулятора давления позволяет с высокой точностью описывать газодинамические и термодинамические процессы, происходящие в газовых потоках.

В результате проведенной идентификации и верификации результатов численного моделирования получено эмпирическое уравнение

температурных параметров регулятора при неизменных барометрических параметрах.

Предложено (в общем виде) нелинейное уравнение температурных параметров регулятора с учетом изменения входных и выходных параметров потока газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. М: Машиностроение, 1969. 183 с.
2. Пиралишвили Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А. И. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
3. Соловьев А. А. Исследование возможности получения изотермического процесса при дросселировании в вихревом регуляторе давления газа // Вестник УГАТУ, Т. 8, № 1. Уфа, 2006. С. 3–6.
4. Свистунов А. В. и др. Исследование влияния тормозного устройства на структуру потока и параметры изотермического вихревого регулятора давления // Вестник УГАТУ. 2011. Т. 14, №4 (44). С. 149–153.
5. Пат. 2237918 РФ, МПК G05D16/00. Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты) / Асадуллин М. З. и др. 2003114801/28; заявлено 19.05.2003; опубл. 10.10.2004. Бюл.28.(НИИТ)
6. Ахметов Ю. М. и др. Опыт реализации квазиизотермического редуцирования в вихревых регуляторах давления энергетических систем // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9. №6 (24). С. 3–6.
7. Ахметов Ю. М., Пархимович А. Ю., Свистунов А. В. Численное моделирование процессов стратификации в изотермическом вихревом регуляторе с внутренним смешением // Вестник УГАТУ. Т. 10, №14 (37), 2010.

ОБ АВТОРАХ

Зангиров Эрнест Ирекович, магистр той же каф. (УГАТУ, 2012). Дипл. бакалавра (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Мухаметов Мансур Вазирович, магистр той же каф. (УГАТУ, 2012). Дипл. бакалавра (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. многофазных течений.

Свистунов Антон Вячеславович, ассист. той же каф., маг. каф. прикл. гидромех. (УГАТУ, 2009). Дипл. бакалавра (УГАТУ, 2007). Канд. техн. наук по гидравл. машинам (УГАТУ, 2012). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Чиндина Александра Александровна, магистр той же каф. (УГАТУ, 2011). Дипл. бакалавра (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. тормозных устройств КВРД.