

УДК 621.6

Ю. М. АХМЕТОВ, А. Ю. ПАРХИМОВИЧ, А. В. СВИСТУНОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ В ИЗОТЕРМИЧЕСКОМ ВИХРЕВОМ РЕГУЛЯТОРЕ С ВНУТРЕННИМ СМЕШЕНИЕМ

Рассматривается актуальная проблема численного моделирования процессов температурной стратификации в изотермическом вихревом регуляторе с целью уменьшения влияния эффекта Джоуля – Томпсона при дросселировании природного газа на газораспределительных пунктах. Представлены обобщенные результаты работ по моделированию процессов в вихревых регуляторах давления газа. Приведены результаты численного моделирования внутренних гидравлических и термодинамических процессов. *Природный газ; вихревая труба; дросселирование; математическая модель; численное моделирование; газодинамика; термодинамика*

Транспортировка природного газа в России осуществляется в основном по газопроводам высокого и среднего давлений. Редуцирование давления газа до потребительского уровня сопровождается снижением температуры, обморожением трубопроводов, кристаллизацией тяжелых углеводородов и несанкционированной влаги, попавшей в трубопровод в результате нарушения технологии транспортировки. Побочные явления редуцирования негативно сказываются на эффективности и безопасности системы транспортировки природного газа и требуют комплексного подхода к решению поставленных задач.

Существующие системы дросселирования давления и регулирования расхода газа при транспортировке его потребителю предусматривают введение различных устройств (дожигание газа, подогрев от постороннего источника тепла) для компенсации снижения температуры. При давлениях магистральных трубопроводов до 7,5 МПа потребителю поступает $3 \cdot 10^{-3}$ МПа, что вызывает снижение температуры не менее чем на 25 градусов. Это вызывает необходимость увеличения эксплуатационных и материальных затрат, а также является причиной усиления негативного воздействия на окружающую среду.

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Проведенные в 2001–2002 гг. исследования ОАО «НИИТ» совместно с УГАТУ позволили разработать принцип дросселирования давле-

ния газа, позволяющий получить снижение давления практически без снижения температуры, а в определенной области перепадов давлений – с некоторым увеличением температуры. Разработанный принцип основан на использовании эффекта температурной стратификации (температурного разделения) при течении газа в вихревых аппаратах типа «вихревых» труб [1, 2, 12, 13]. Хотя «вихревые» трубы и их особенности описаны во многих публикациях, ни в одном источнике не рассматривается вопрос о смешении стратифицированных потоков. Это, вероятно, объясняется стремлением авторов получить (с максимальной реализацией) один из эффектов, охлаждение или нагрев потока, из потребительских соображений.

Большое количество результатов работ вихревых труб на природном газе [18] позволяет построить температурные характеристики стратифицированных потоков на входе вихревой трубы, из которых видно, что в определенном диапазоне массовых соотношений (коэффициента μ) смеси поток может иметь температуру, превышающую температуру газа на входе в вихревое устройство [3–9].

Таким образом, на первый взгляд нарушается эффект Джоуля – Томпсона непрямого охлаждения газа при дросселировании давления. Однако особенность процессов в вихревых трубах состоит в том, что эффект Джоуля – Томпсона при дросселировании давления проявляется дважды: по «холодному» потоку (значительное превышение эффекта охлаждения) и по «горячему» (меняется знак температурного эффекта).

На основании анализа материалов испытаний вихревых труб в ОАО «НИИТ» совместно с кафедрой прикладной гидромеханики УГАТУ была разработана конструкция и изготовлен первый регулятор давления газа, позволяющий реализовать внутреннее смещение стратифицированных в вихревой трубе потоков. Принципиальной особенностью изготовленного вихревого регулятора является то, что обеспечивалась его работа в диапазоне расходов газа 10...100%, в то время как известные вихревые трубы выполняются с постоянной геометрией. Кроме того, в результате реализовался эффект положительной обратной связи, за счет передачи части тепла от «горячего» потока входному потоку, что вызывает подогрев газа на выходе из регулятора. Основные качественные положения (наличие «положительной» обратной связи, наличие повышения температуры газа после дросселирования давления в вихревом регуляторе) нашли подтверждение в экспериментальной отработке двух типов вихревых газовых регуляторов – для газораспределительных станций в интервале давлений в магистрали 0,6–4,5 МПа при расходе газа до $2,0 \times 10^4 \text{ м}^3/\text{час}$ и для газораспределительных пунктов (ГРП) в интервале давлений 0,3–0,6 МПа при расходе газа до $500 \text{ Нм}^3/\text{час}$.

Испытания проводились на стенде УГАТУ на сжатом воздухе и для регулятора ГРП – на природном газе в организации «Тюменьнефтегаз».

Показано, что:

- температура газа на входе в регулятор повышается после обтекания специальной оребренной головки «горячего» плеча вихревой трубы регулятора на 3–6 °С, повышая тем самым температуру газа на входе в вихревую камеру (т. е. обеспечивается функционирование «положительной» обратной связи по температурному контуру);

- температура газа на выходе вихревого регулятора после дросселирования давления повышается на 3–5 °С, т. е. возможно практически изотермическое редуцирование давления газа.

Наличие экспериментального подтверждения возможности изотермического дросселирования давления имеет большое теоретическое и прикладное значение. Для обеспечения возможности поиска оптимизированных конструктивных решений, поиск которых экспериментальным путем представляется чрезвычайно громоздким и дорогостоящим, необходима разработка расчетных методик описания физических процессов, для чего необходима разработка математической модели этих процессов пу-

тем идентификации моделей по результатам экспериментальной обработки численного моделирования и создания численно-имитационных моделей.

Кроме вышеперечисленных вопросов, не получивших развития в изучении, существует множество других проблем для развития определенного направления в науке. Такими направлениями могут стать регулируемый по температуре процесс дросселирования газа, получение сверхнизких температур в области вихревой камеры, влияние динамики переходных процессов на структуру потока и тепловые процессы. В области каждого из подобных вопросов можно развить ряд направлений, которые будут обладать новизной и практической ценностью, а с учетом наличия материально-технического обеспечения поддержаны экспериментом.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Настоящая работа посвящена обобщению полученных материалов по реализации возможности изотермического дросселирования давления газа и разработке математических моделей процессов и теоретических обоснований возможности их реализации и применения.

Численное моделирование газодинамических процессов проводилось в пакете прикладных программ Flow Simulation 2009. Пакет предназначен для решения широкого круга задач гидрогазодинамики.

Первым шагом в разработке численной модели является такая постановка научных вопросов, которая может эффективно ответить на вопросы, стоящие перед моделированием. Основными интересующими вопросами является описание течения в проточной части ИВРД, выявление особенностей течения и определение возможности снижения величины влияния дроссель-эффекта. Для этого необходимо детально рассмотреть течение как во всем объекте, так и в отдельных частях, в связи с чем наиболее значимыми из представленных частей регулятора для достижения поставленных целей можно выделить:

- винтовую головку (устройство предварительного подогрева и закрутки с целью снижения величины местного сопротивления на участке входа в закручивающее устройство);

- закручивающее устройство (позволяющее реализовать регулируемое критическое сечение на входе в камеру энергетического разделения потока);

- устройство торможения потока (позволяющее уменьшить величину закрутки потока практически до нуля и увеличить время контакта газа с внутренними стенками винтовой головки);

- устройство возврата потока (выполненное в виде трубки возврата с коллекторными тарелками, возвращающими поток газа, заторможенный на лопатках устройства торможения, в центральную область камеры энергетического разделения потока).

Для разработки твердотельной модели использовался SolidWorks 2009, твердотельная модель представляет собой сборку, аналогичную реальному объекту, выполненную в соответствии с действительными особенностями проточной части и конструктивным исполнением.

В процессе разработки твердотельной модели выявлены конструктивные особенности, которые необходимо изучить и рассмотреть более детально:

- кольцевой канал и местное расширение в нем;
- ступенька на выходе из винтовой головки;
- проточная часть соплового ввода;
- дефлектор и его геометрические соотношения (устройство торможения);
- трубка возврата потока из зоны торможения в область осевого разряжения;
- диаметр диафрагмы и угол раскрытия диффузора.

3. ФОРМИРОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Используя математическое моделирование как для изучения, так и для предсказания поведения физической системы, описывая как отдельные процессы, действующие в системе, так и их взаимодействие, можно получить количественную оценку параметров, характеризующих протекающие процессы. После построения модели и проведения контрольных тестов модель можно использовать для интерпретации измерений и наблюдений, оценки новых идей, распространения теоретических моделей на область новых режимных параметров. Целью моделирования являются попытки воспроизвести некоторые из основных свойств системы, а не создать точную копию системы.

Расстановка граничных условий на созданной модели позволяет задать системе определенные свойства. Отсутствие теплообмена с окружающей средой при задании внешним стенкам адиабатических свойств, способность

стенки проводить тепло при задании внутренним стенкам свойства реальной стенки позволяют задать системе параметры теплообмена. Выбор сжимаемой среды позволяет более детально определить параметры сопряженного теплообмена между жидкой и твердой стенкой. [10].

Математическое описание геометрии системы содержится в твердотельной геометрии объекта (рис. 1), а описание процессов, протекающих в самом объекте, содержится в математической модели этих процессов.

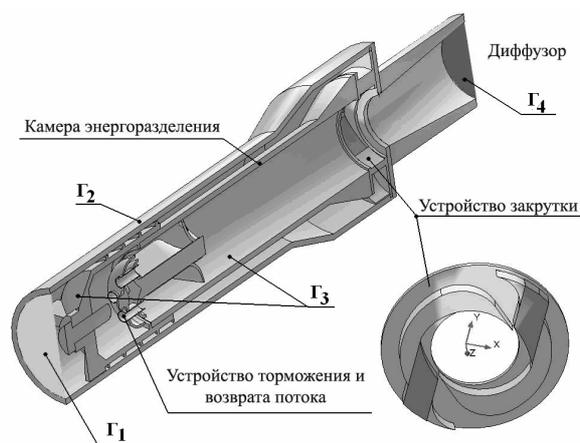


Рис. 1. Трехмерная твердотельная модель вихревой трубы

Система уравнений математической модели, составляемая аппаратом программного комплекса Flow Simulation 2009, после расстановки граничных и начальных условий будет включать в себя:

- уравнение неразрывности;
- уравнения движения;
- уравнение состояния;
- уравнения сохранения энтальпии и переноса;
- модель турбулентности.

Для описания термогазодинамических характеристик турбулентных течений в квазистационарной постановке, уравнения математической модели из классической формы преобразуются методом Рейнольдса и записываются в тензорном виде.

Уравнение неразрывности для сжимаемой среды:

$$\frac{\partial(\rho \cdot U_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где U_i – осредненная скорость; x_i – декартова координата ($i = 1, 2, 3$); ρ – плотность.

Уравнение движения

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_i U_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \overline{Sh_{ji}}) - \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u'_i u'_j), \quad (2)$$

где u_i, u_j – пульсации скоростей; x_j – декартова координата ($j = 1, 2, 3; i \neq j$); μ – кинематическая вязкость; P – нормальное напряжение; $\overline{Sh_{ij}}$ – тензор деформаций, определяемый выражением:

$$\overline{Sh_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right). \quad (3)$$

Вследствие нелинейности уравнений Навье-Стокса в уравнениях Рейнольдса появляются дополнительные члены $\tau_{ij} = \rho u'_i u'_j$, которые получили название напряжений Рейнольдса.

При осреднении **уравнения энергии**:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j H + q_i - U_i \tau_{ij}) = 0, \quad (4)$$

появляется неизвестный член $q_i = -\rho u'_i \phi'_i$, называемый турбулентными потерями тепла.

Уравнение для полной энтальпии:

$$H = \frac{1}{2} u_i u_i + h, \quad (5)$$

где h – статическая энтальпия.

Для замыкания системы уравнений необходимо определить зависимости, описывающие функции τ_{ij} и q_i . Данная задача решается с помощью модели турбулентности.

При численных расчетах турбулентных течений система уравнений движения среды дополняется моделями турбулентности, позволяющими рассчитать значения турбулентных добавок, входящих в эти уравнения. Существует множество моделей турбулентности, которые можно разделить на три группы:

- модели напряжений Рейнольдса;
- модели турбулентной вязкости;
- модели крупных вихрей.

В решении данной задачи используется квазистационарная полуэмпирическая k - ε -модель турбулентности. Ее выбор обусловлен соответствием условиям универсальности, эффективности по затратам счетного времени и широко известным приложениям.

Касательные напряжения для вязкой ньютоновской жидкости определяются в данной модели следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \cdot \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \cdot \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \cdot \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \quad (6)$$

где $\mu = \mu_l + \mu_t$; μ_l – ламинарная вязкость; μ_t – турбулентная вязкость; k – турбулентная кинетическая энергия; δ_{ij} – дельта-функция Кронекера, равная единице при $i=j$ или нулю в любом другом случае.

Для замыкания системы уравнений применяются уравнения переноса турбулентной кинетической энергии и уровня ее диссипации согласно k - ε -модели. В k - ε -модели турбулентности μ_t определяется с использованием двух основных свойств турбулентности – турбулентной кинетической энергии k и турбулентной диссипации ε

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k}{\varepsilon}, \quad (7)$$

здесь f_μ – показатель турбулентной вязкости, определяемой из выражения:

$$f_\mu = (1 - e^{-0,025 R_T})^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T}\right), \quad (8)$$

где $R_T = \frac{\rho \cdot k^2}{\mu_l \cdot \varepsilon}$, $R_T = \frac{\rho \cdot y \cdot \sqrt{k}}{\mu_l}$, y – расстояние от стенки.

Уравнение турбулентной кинетической энергии (k):

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon. \quad (9)$$

Уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии (ε):

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} f_1 \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k}, \quad (10)$$

где эмпирические функции:

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3, \quad (11)$$

$$f_\mu = (1 - e^{-0,025 R_T})^2 \left(1 + \frac{20,5}{R_T}\right), \quad (12)$$

$$f_2 = 1 - e^{-R_T^2}, \quad (13)$$

определяются параметрами течения:

$$R_T = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon} \quad \text{– турбулентное число Рейнольдса};$$

са;

$$R_y = \frac{\rho y \sqrt{k}}{\mu} - \text{число Рейнольдса ламинарно-}$$

го потока;

y – расстояние от стенки до ближайшего расчетного узла;

$$\mu_\tau = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} - \text{турбулентная вязкость};$$

$$q_i = -\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_\tau}{Pr_\tau}\right) c_p \frac{\partial T}{\partial x_i} - \text{диффузионные по-}$$

тери тепла.

Эмпирические константы модели турбулентности:

$$C_\mu = 0,009, C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, \sigma_\varepsilon = 1,3,$$

$$\sigma_k = 1.$$

c_p – изобарная теплоемкость;

T – полная температура;

k (индекс) = 1,2,3;

Pr – число Прандтля ламинарного потока;

$Pr_\tau = 0,9$ – турбулентное число Прандтля.

В существующих моделях вихревых течений для описания состояния газа используется уравнение идеального газа Менделеева – Клапейрона. Такое допущение корректно лишь для узкого диапазона параметров течения газа в вихревой трубе. Это связано со свойством сжимаемости реальных газов, которое не описывается уравнением состояния идеального газа.

В общем виде уравнение состояния газа записывается следующим образом [14]:

$$Z_{сж} = \frac{p\nu}{RT}, \quad (14)$$

где $Z_{сж}$ – коэффициент сжимаемости; p – давление; ν – удельный объем; R – газовая постоянная; T – температура.

В случае идеального газа $Z_{сж} = 1$, однако для реальных газов эта величина является переменной.

Уравнения состояния идеального газа Ван-дер-Ваальса и Редлиха – Квонга были выбраны как наиболее общеупотребимые для широкого диапазона изменения параметров состояния газа [15, 16]. Оба уравнения представляют собой кубические уравнения состояния. В общем виде они выражаются зависимостью:

$$p = \frac{R \cdot T}{(\nu - b)} - \frac{\theta \cdot (\nu - \eta)}{(\nu - b) \cdot (\nu^2 + \delta \cdot \nu + \xi)}, \quad (15)$$

где значения параметров $\theta, \eta, \delta, \xi$ приведены в таблице.

Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса описывается следующим выражением:

$$\left(p + \frac{a}{\nu^2}\right) \cdot (\nu - b) = R \cdot T, \quad (16)$$

где a, b – константы, характеризующие величину сил притяжения молекул и величину сил отталкивания соответственно, определяемые значениями критических параметров газа.

$$a = 3 \cdot p_{кр} \cdot \nu_{кр}^2, \quad b = \frac{R \cdot T_{кр}}{8 \cdot p_{кр}}.$$

Параметры уравнений состояния

Уравнение	θ	η	δ	ξ
Ван-дер-Ваальса	a	b	0	0
Редлиха – Квонга	a/\sqrt{T}	b	b	0

Уравнение состояния Редлиха – Квонга выглядит следующим образом:

$$p = \frac{R \cdot T}{\nu - b} - \frac{a}{(\nu + b) \cdot \nu \cdot \sqrt{T}}, \quad (17)$$

$$a = \frac{0.42748 \cdot R^2 \cdot T_{кр}^{2.5}}{p_{кр}}, \quad b = \frac{0.08662 \cdot R \cdot T_{кр}}{p_{кр}}.$$

Анализ данных таблицы демонстрирует более адекватное описание состояния многокомпонентного газа, которым и является воздух, уравнением Редлиха – Квонга, учитывающим величину δ , характеризующую взаимодействие между молекулами различных компонентов газовой смеси.

Исходя из условия применения уравнения Редлиха – Квонга:

$$\frac{p}{p_{кр}} < \frac{T}{2 \cdot T_{кр}}, \quad (18)$$

определено, что данное уравнение справедливо для всего диапазона рассматриваемых параметров потока. Следовательно, для описания состояния газа в разрабатываемой математической модели принято уравнение Редлиха – Квонга.

Основная масса явлений, моделируемых с помощью CFD-методов (Computational Fluid Dynamics методов вычислительной гидродинамики), описывается нелинейными уравнениями в частных производных. Для решения этих уравнений используется метод конечных элементов, который обладает большей вычислительной эффективностью и эффективной аппроксимацией дифференциальных уравнений динамики жидкости и газа [11].

Устранение (уменьшение) ошибки пространственной дискретизации достигается путем последовательного решения задачи на рас-

четных сетках различной густоты (рис. 2). Первоначально задача решается на грубой расчетной сетке с ячейками больших размеров. Потом сетка постепенно измельчается до тех пор, пока при измельчении ячеек не происходит изменения величины целевой функции. В целях уменьшения размеров расчетной сетки возможно применение локального измельчения в тех местах, где это особенно необходимо.

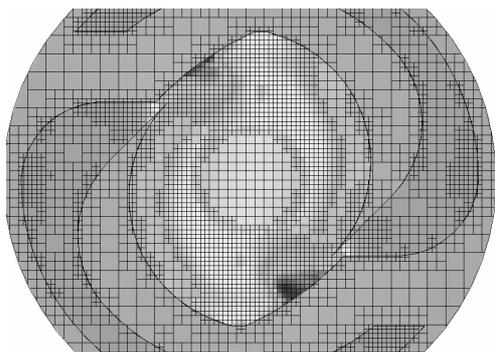


Рис. 2. Локальное измельчение расчетной сетки

4. АНАЛИЗ И ТРАКТОВКА РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате численного моделирования термогазодинамических процессов в ИВРД получены следующие результаты:

- выявлено наличие тепловых потоков, определены их направления и влияние на температурную стратификацию, обратные связи по тепло- и массопереносу;
- показано течение потока газа во внутреннем контуре ИВРД, что позволило определить взаимодействие вихревых потоков;
- выявлены особенности элементов конструкции проточной части, влияющие на структуру и формирование вихревого потока (наличие и отсутствие кольцевого канала во внешнем контуре, наличие и отсутствие крупных вихревых структур при различном исполнении тормозного устройства).

Результаты численного моделирования позволяют визуализировать направление течения потоков газа в наружном и внутренних контурах ИВРД и определить структуру и характер взаимодействия вихревых потоков (рис. 3). Это позволяет определить картину теплового взаимодействия внутреннего и внешнего контуров, области подогрева и охлаждения стенок внутреннего контура и подтвердить наличие положительной обратной связи для обеспечения изотермического дросселирования потока газа.



Рис. 3. Линии тока в проточной части регулятора

Визуализация теплового взаимодействия контуров позволяет определить направления теплообмена на различных участках корпуса внутреннего контура, четко определить характерные места подогрева и охлаждения внутреннего контура. Параметрами, влияющими на изменение температуры стенок внутреннего контура, является температура и скорость потока газа в камере торможения. Поля температур внутри камеры энергоразделения показывают качественное отличие температуры входного газа от температуры «горячего» потока. Температура потока, попавшего в межлопаточное пространство устройства торможения, подогревает как стенки лопаток, так и внутренние стенки винтовой головки. Поток газа, обтекающий винтовую головку, по средствам теплообмена отбирает часть тепла от стенок винтовой головки и попадает в кольцевой канал. При этом внешний поток имеет температуру, меньшую по отношению к температуре потока в области устройства торможения. Образованный градиент температуры в области винтовой головки позволяет повысить температуру газа перед входом в камеру энергоразделения, а поток газа, достигший максимальной температуры на входе в межлопаточное пространство, передавая тепло стенкам, позволяет осуществить механизм положительной обратной связи.

Основной особенностью конструкции проточной части ИВРД, определяющей структуру стратифицированных потоков и характер теплообменных процессов, является наличие тормозного устройства во внутреннем контуре в конце камеры энергоразделения. В отличие от известной «крестовины» [12], данное тормозное устройство состоит из многосекционного профилированного лопаточного венца с кольцевым дефлектором и центральным каналом переброса горячего потока торможения в приосевую зону камеры энергоразделения с пони-

женным давлением. Такое тормозное устройство позволяет более эффективно ликвидировать крупновихревую структуру, получаемую при температурной стратификации в камере энергоразделения [17].

По результатам анализа термодинамических и газодинамических параметров процесс температурной стратификации характеризуется наличием зоны высокой статической энтальпии в приосевой вихревой зоне с пониженным давлением, благодаря которой происходит перетекание тепловых потоков из приосевой в периферийную зону. Наличие крупновихревых структур, получаемых в камере энергоразделения, способствует интенсификации температурной стратификации и повышению холодопроизводительности.

Эффективная ликвидация вихревых структур специальным тормозным устройством с организацией переброса части тепловой энергии в центральную зону камеры энергоразделения обеспечивает внутреннее смешение стратифицированных потоков и в целом дросселирование давления в изотермическом цикле [3–5] (рис. 4).

Наличие тормозного устройства позволяет реализовать раскрутку основного потока и его торможение в результате взаимодействия потока с лопаточным венцом, на котором происходит торможение потока до скоростей порядка 15–40 м/с и разделение его на несколько локальных потоков (рис. 5).

Локальный поток образуется в результате прохождения по межлопаточному пространству, при этом он обладает остаточной закруткой и высокой температурой (рис. 6).

Закрученный в межлопаточном пространстве поток отдает тепло стенкам лопаток и стенке основной вихревой камеры. В связи с тем, что площадь соприкосновения локального потока с поверхностью лопаток больше, чем поверхность вихревой камеры, температура лопаточного венца выше, чем температура стенок на 2–3 градуса.

Внутренний контур имеет две области температурного градиента, это градиент температур нагрева внешнего потока и градиент температуры охлаждения потока. Область подогрева входного потока начинается с торца винтовой головки и имеет область максимального градиента температур в стенке внутреннего контура, в области входа закрученного потока в межлопаточное пространство (рис. 7).

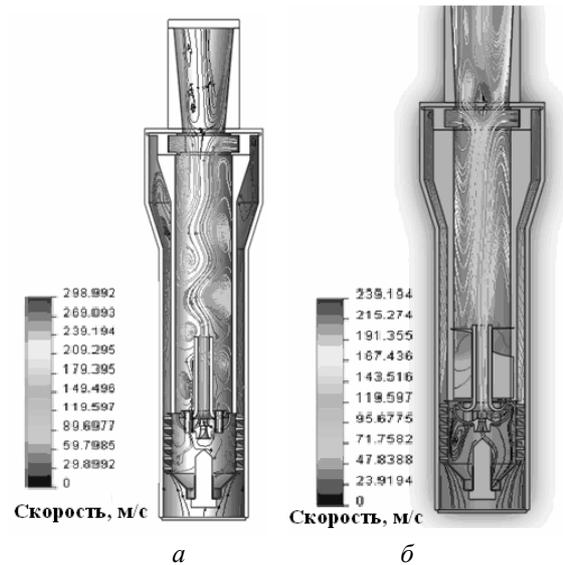


Рис. 4. Структура потока в вихревой камере: а – без лопаток; б – с лопатками

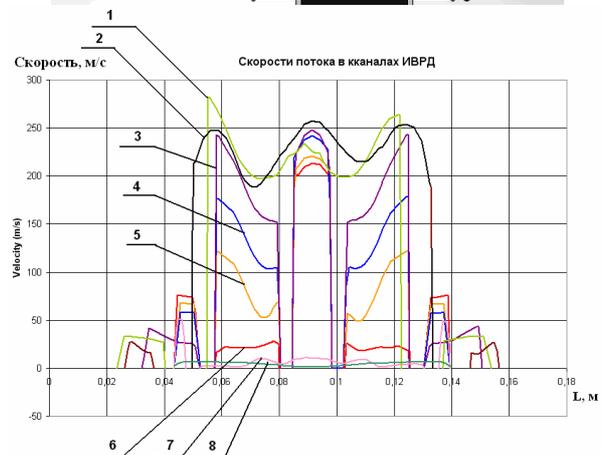
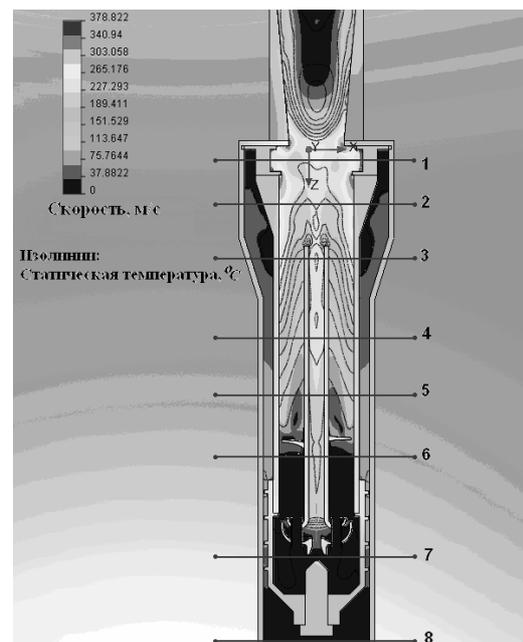


Рис. 5. Скорости потока в каналах ИВРД

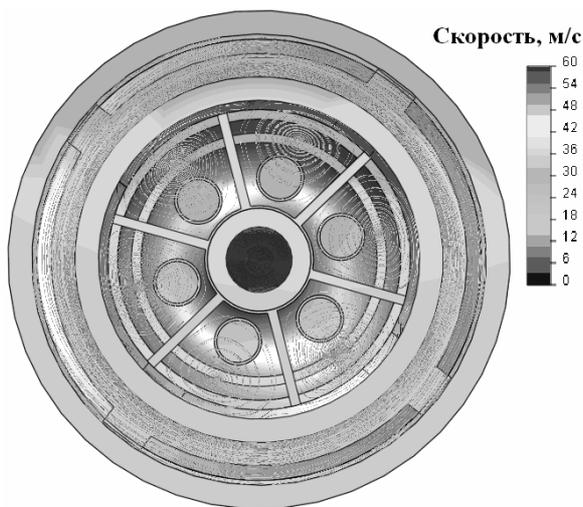


Рис. 6. Закрутка потоков в межлопаточном пространстве

Изменение температуры стенки внутреннего контура
Температура стенки, °C

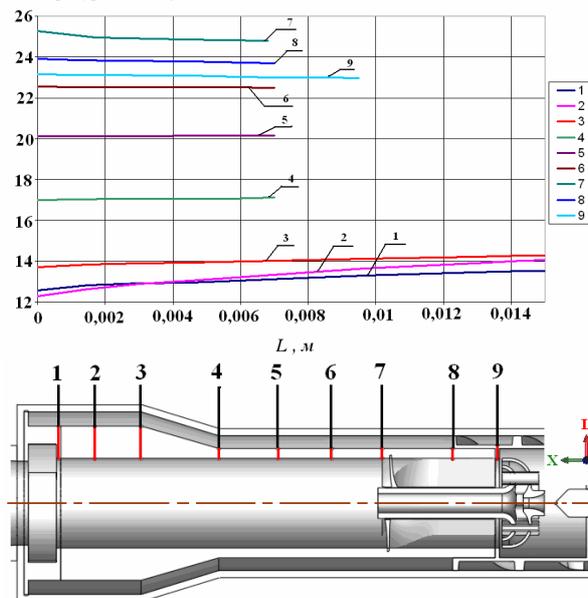


Рис. 7. Радиальное изменение температуры стенки вдоль оси

Картина температурных градиентов зависит от структуры потока в камере энергоразделения. Так, изменение площади диафрагмы приводит к изменению структуры потока и изменению области температурных градиентов, которые смещаются по стенке вдоль оси трубы (рис. 8). Увеличение диаметра диафрагмы приводит к тому, что низкотемпературная область потока смещается в камеру энергоразделения, а в случае уменьшения диаметра диафрагмы низкотемпературная область перемещается за

пределы камеры энергоразделения и располагается в области выходного диффузора и устройства закрутки потока. Низкотемпературная область представляет собой сложную структуру, а процесс ее возникновения и существования в проточной части практически не исследован.

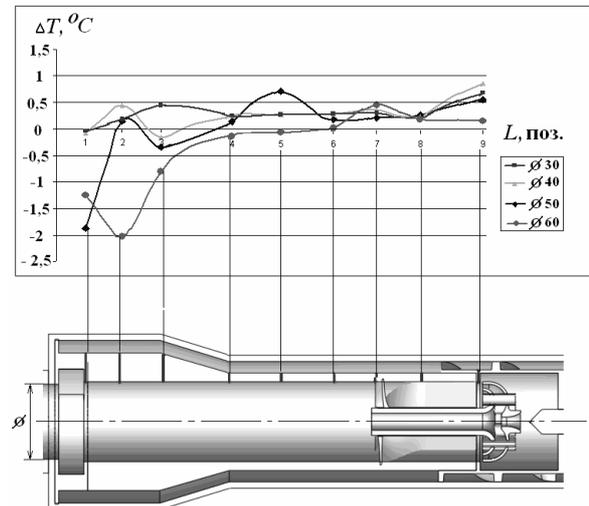


Рис. 8. Радиальное изменение перепада температуры стенки вдоль оси

На структуру потока, кроме геометрии проточной части, также влияет давление воздуха на входе. Изменения структуры потока отражаются на угле закрутки потока в камере энергоразделения и соответственно на угле входа потока в межлопаточное пространство.

Проведенные расчеты позволяют качественно показать влияние толщины стенок на подогрев газа во внешнем контуре ИВРД и качественно определить области и направления теплообмена как по длине, так и по толщине стенки внутреннего контура, показавшие наличие областей подогрева и охлаждения газа, подаваемого на вход в ИВРД.

Площадь диафрагмы влияет на поток в камере энергоразделения и, следовательно, на изменение температуры стенки как вдоль оси трубы (рис. 9), так и по ее толщине (рис. 8).

При изменении площади сечения диафрагмы изменяются отношения диаметров трубы и диаметров диафрагмы, вследствие чего в осевом направлении образуется радиальный уступ, который является местным сопротивлением, препятствующим сквозному истечению из регулятора, на котором происходит дросселирование.

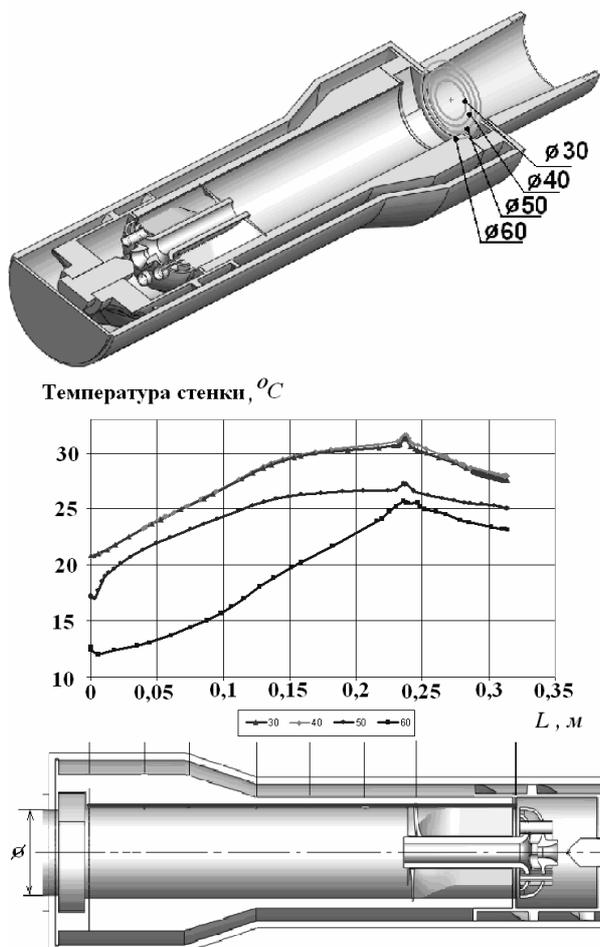


Рис. 9. Осевое изменение температуры стенки

Расширяющийся поток, истекающий из сопла, приобретая осевое направление течения, протекая по вихревой камере, приобретает тангенциальную закрутку и претерпевает температурное энергоразделение. Изменение площади диафрагмы приводит к изменению количества проходящего через вихревую камеру воздуха, а соответственно, скорости и температуры протекающего потока.

ВЫВОДЫ

1) Произведены анализ и обобщение результатов опубликованных работ по изучению ИВРД и их применению в качестве устройств редуцирования магистрального газа, что дало возможность получения изотермического процесса при дросселировании давления газа.

2) Численным моделированием показано наличие тепловых потоков, определены их направления и влияние на температурную стратификацию, а также выявлены обратные связи по тепло- и массопереносу. Показанное течение газа во внутреннем контуре ИВРД позволило определить взаимодействие вихревых потоков.

Выявлены особенности элементов конструкции проточной части, влияющие на структуру и формирование вихревого потока и возможность использования положительной обратной связи во внутреннем контуре для повышения эффективности процесса теплообмена в ИВРД.

3) Проведены экспериментальные исследования процессов вихревых течений в ИВРД, результаты экспериментальных работ сопоставлены с результатами численного эксперимента. Это позволило сделать вывод об адекватности численного моделирования.

4) По результатам экспериментальных работ и численных экспериментов сделан анализ конструкции и дан ряд рекомендаций по проектированию отдельных элементов ИВРД, таких как винтовая головка, кольцевой канал, устройство торможения и возврата потока и диафрагма.

5) С целью повышения эффективности изотермического дросселирования рекомендуется:

- ликвидировать зазоры между лопатками тормозного устройства и внутренней стенкой внутреннего контура;
- уменьшить гидравлическое сопротивление винтовой головки;
- для повышения эффективности положительной обратной связи уменьшить толщину стенок внутреннего контура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ranque G. J. Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air // J Phys Radium (Paris). 1933. № 4. P. 112–114.
2. Hilsch R. The use of expansion of gases in a centrifugal field as a cooling process // Rev Sci Instrum. 1947. № 18(2). P. 108–113.
3. Разработка, изготовление и поставка опытного образца изотермического регулятора давления для редуцирования на ГРС без подогрева газа / А. М. Русак [и др.] // Технический отчет по договору № 489 от 16.07.02 г. (I этап) / ОАО «НИИТ». Уфа, 2002.
4. Разработка, изготовление и поставка опытного образца изотермического регулятора давления для редуцирования на ГРС без подогрева газа / А. М. Русак [и др.] // Технический отчет по договору № 489 от 16.07.02 г. (II этап) / ОАО «НИИТ». Уфа, 2002.
5. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак [и др.] // Сб. науч. тр. IV Междунар. совещ. по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М.: ИМАШ РАН, 2004. С. 133–144.
6. Разработка теоретических и методологических основ создания энергосырьевых комплексов утилизации энергии давления магистральных газо-

проводов. Этап 2004 г. Оптимизация параметров ЭСК, проектирование и изготовление вихревого газового регулятора. Испытания регулятора: Отчет по проекту ФЦП «Интеграция», государственный контракт № Л0106/1028 от от 24.07.02 г. / ГОУ ВПО УГАТУ, ОАО «НИИТ», ФГУП «МОТОР». Уфа, 2004.

7. Исследование изотермического принципа редуцирования газа и разработка на его основе основных узлов изотермического вихревого редуктора давления газа: Отчет № госрегистрации 01200602665 о выполнении НИОКР по государственному контракту № 3277р/5755 от 26.07.05 г. / ООО «Изотерма». Уфа, 2006.

8. **Гурин С. В., Соловьев А. А.** Исследование возможности получения изотермического процесса при дросселировании в вихревом регуляторе давления газа // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 8, № 1(17). С. 3–6.

9. Опыт реализации квазиизотермического редуцирования в вихревых регуляторах давления энергетических систем. / Ю. М. Ахметов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 6 (24). С. 3–6.

10. Основы компьютерного моделирования технических систем: учеб. пособие / Р. К. Газизов [и др.]. Уфа: УГАТУ, 2008. 143 с.

11. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский [и др.]. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.

12. **Меркулов А. П.** Вихревой эффект и его применение в технике. Самара: Оптима, 1997. 292 с.

13. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.

14. **Вукалович М. П., Новиков И. И.** Термодинамика: Учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1972. 672 с.

15. **Ферми Э.** Термодинамика: Учеб. пособие для вузов. Харьков: Изд. Харьковск. ун-та, 1969. 137 с.

16. Теплотехнический справочник. М.: Энергия, 1975. 744 с.

17. **Пархимович А. Ю.** Имитационное моделирование температурной стратификации закрученных потоков в вихревых хладогенераторах: дис.. канд. техн. наук, 2009. 124 с.

18. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Р. Х. Мухутдинов [и др.]. Уфа: Реактив, 2001. 342 с.

ОБ АВТОРАХ



Ахметов Юрий Мавлютович, доц. каф. прикл. гидромех., зам. ген. дир. НИИТ. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1959). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (МАИ, 1978). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.



Пархимович Александр Юрьевич, асс. той же каф. Дипл. инж.-мех по гидравл. машинам (УГАТУ, 2004). Канд. техн. наук по гидравл. машинам (УГАТУ, 2008). Иссл. в обл. вихревых течений.



Свистунов Антон Вячеславович, магистр (УГАТУ, 2009). Дипл. бакалавр техн. и технол. по энергомашиностр. (УГАТУ, 2007) Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.