

Ю. М. АХМЕТОВ, А. Ю. ПАРХИМОВИЧ, А. В. СВИСТУНОВ,
А. А. СОЛОВЬЕВ, В. А. ЦЕЛИЩЕВ, А. А. ЧИНДИНА

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТОРМОЗНОГО УСТРОЙСТВА НА СТРУКТУРУ ПОТОКА И ПАРАМЕТРЫ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВИХРЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ

Рассматривается актуальная проблема влияния тормозного устройства на структуру потока в изотермическом вихревом регуляторе, на тепловые процессы при дросселировании природного газа на газораспределительных пунктах. Представлены обобщенные результаты работ по моделированию процессов в вихревых регуляторах давления газа. Приведены результаты численного моделирования, анализ влияния геометрических и термодинамических процессов. *Природный газ; вихревая труба; дросселирование; математическая модель; численное моделирование; газодинамика; термодинамика*

Транспортировка природного газа с высоким уровнем давления в транспортных магистралях до 6,0–7,5 МПа, для увеличения их пропускной способности, вызывает необходимость снижения давления до $3 \cdot 10^{-2}$ – 10^{-3} МПа для использования в горелочных устройствах потребителя. Известный эффект дросселирования давления вызывает снижение температуры газа на 25° – 35° и, как следствие, обмерзание газопроводов, арматуры и элементов автоматики с выходом их из строя. Применяемые в настоящее время технологии «подогрева» природного газа перед дросселированием в специальных подогревательных устройствах (за счет сжигания части транспортируемого газа) являются затратными как с точки зрения расходования транспортируемого сырья, так и затрат на ликвидацию негативных экологических последствий [1–3].

По заказу ООО «Баштрансгаз» (договор №489 от 16.07.02 г.) с 2001 года в ОАО НИИТ, совместно с кафедрой прикладной гидромеханики (ПГМ) УГАТУ, проводятся исследовательские работы по изучению особенностей процессов температурной и массовой стратификации при дросселировании давления газов в вихревых устройствах (вихревых трубах).

Анализ этих особенностей показывает, что физический и термодинамический процесс снижения давления на вихревых устройствах типа вихревых труб (эффект Ранка – Хилша) принципиально отличается от процессов дросселирования на обычных дроссельных устройствах (резкое изменение геометрии трубопроводов). На обычных дроссельных устройствах температура газа снижается из-за действия известного эффекта Джоуля – Томсона, зависящего от природы и состава газа.

При прохождении газа через вихревые трубы, как известно, наблюдается температурная стратификация на «холодный» и «горячий» потоки, что, как по «холодной», так и по «горячей» составляющим, противоречит классическому дроссель-эффекту. В ОАО НИИТ разработаны и испытаны на специальном стенде, совместно с кафедрой ПГМ УГАТУ, регуляторы давления газа с внутренним смешением «холодного» и «горячего» потоков после температурной стратификации. Показано, что температура «смесового» потока на выходе регулятора, в определенном диапазоне условий по расходу газа и давлению, может превышать температуру газа на входе. Это говорит о возможности реализации квазиизотермического цикла процесса дросселирования, что дополнительно исследовалось в работах [6, 7, 8, 11] методами численного моделирования.

Настоящая работа посвящена обобщению результатов численного моделирования процессов теплового взаимодействия потоков газа и исследованию влияния устройства торможения потока газа на термодинамическую картину процесса дросселирования давления газа. В процессе анализа работы будет уточнена схема положительной обратной связи по тепловому контуру, определены условия ее существования и факторы, оказывающие влияние на процесс теплопереноса.

Основными интересующими вопросами является описание течения в проточной части изотермического вихревого регулятора давления (ИВРД), выявление особенностей течения и определение возможных способов снижения величины влияния дроссель-эффекта. Для этого необходимо детально рассмотреть течение газа с декомпозицией объекта на составные части, в связи с чем можно выделить наиболее значимые

из представленных частей регулятора для достижения поставленных целей:

- винтовая головка (устройство закрутки и предварительного подогрева на участке входа в устройство стратификации);

- цилиндрическая труба температурной стратификации;

- тормозное устройство;

- профилированная передняя кромка лопаточного венца (область входа потока в межлопаточное пространство);

- межлопаточное пространство (термогазодинамические процессы в нем);

- лопасти и тепловые потоки в них;

- камера торможения за крестовиной (с теплообменом через теплопроводную стенку головки с потоком входящего в камеру стратификации из камеры торможения газа);

- канал отвода газа в центральную часть.

Численное моделирование течения газа в ИВРД производилось в пакете прикладных программ SolidWorks Cosmos FlowWorks с учетом теплообмена между элементами с учетом температурных градиентов.

Математическое описание геометрии проточной части содержится в твердотельной геометрии объекта (рис. 1), а описание газодинамических и тепловых процессов, протекающих в самом объекте, содержится в поэлементной схеме. Система уравнений математической модели, решаемая аппаратом программного комплекса Flow Simulation 2010, после расстановки граничных и начальных условий включает в себя [5]:

- уравнение неразрывности

$$(\rho u^j)_{,j} = 0,$$

- уравнение движения

$$\rho u^j u^i_{,j} = (2\mu e^{ij} - \frac{2}{3}\mu u^k_{,k} g^{ij} - pg^{ij})_{,j},$$

- уравнение энергии

$$\rho c_p u^j \frac{\partial \tau}{\partial x^j} = u^j \frac{\partial p}{\partial x^j} + g^{ij} (\lambda \frac{\partial \tau}{\partial x^j})_{,j} + 2\mu e^{ij} - \frac{2}{3} (u^j_{,j})^2.$$

Верхние индексы обозначают контравариантные, а нижние – ковариантные составляющие соответствующих тензоров; индекс «запятая» внизу обозначает делать ковариантное дифференцирование по соответствующей координате; e^{ij} – контравариантные составляющие тензора скоростей деформации, которые равны

$$e^{ij} = \frac{1}{2} (g^{ik} u^j_{,k} + g^{jk} u^i_{,k}),$$

g^{ik} – контравариантные составляющие метрического тензора; μ – коэффициент вязкости; λ – коэффициент теплопроводности; c_p – коэффициент

удельной теплоемкости при постоянном давлении; ρ – плотность; u^i – контравариантная составляющая вектора скорости; T – температура; p – давление.

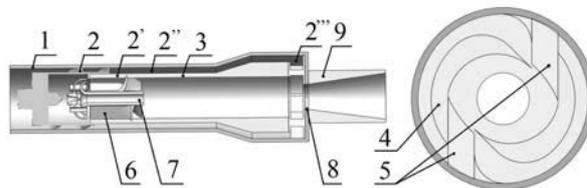


Рис. 1. Твердотельная модель ИВРД:

- 1 – наружная теплоизолирующая труба,
- 2 – винтовая теплопередающая головка,
- 2' – теплопроводная цилиндрическая стенка вихревой трубы, 2'' – кольцевой канал закрученного потока, 2''' – камера входа в закручивающее устройство, 3 – камера температурной стратификации (вихревая труба),
- 4 – закручивающее устройство, 5 – регулирующие клинья, 6 – устройство торможения,
- 7 – устройство поворота потока газа,
- 8 – диафрагма, 9 – диффузор

- В решении данной задачи используется квазистационарная полуэмпирическая k - ϵ -модель турбулентности.

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

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

Для замыкания системы уравнений применяются уравнения переноса турбулентной кинетической энергии и уровня ее диссипации согласно k - ϵ -модели.

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k}{\epsilon}.$$

Уравнение турбулентной кинетической энергии (k):

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon.$$

Уравнение диссипации турбулентной кинетической энергии (ϵ):

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left((\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_k} \right) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} f_1 \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} f_2 \frac{\rho \epsilon^2}{k}.$$

- 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.

Уравнения состояния идеального газа Ван-дер-Ваальса и Редлиха – Квонга были выбраны как уравнения для широкого диапазона изменения параметров состояния газа [8, 9]. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса описывается следующим выражением:

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

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

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

Уравнение состояния Редлиха – Квонга выглядит следующим образом:

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

$$a = \frac{0,42748 \cdot R^2 \cdot T_{kr}^{2,5}}{p_{kr}}, \quad b = \frac{0,08662 \cdot R \cdot T_{kr}}{p_{kr}}.$$

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

Систему уравнений движения среды при численных расчетах турбулентных течений дополнили моделями турбулентности, позволяющими рассчитать значения турбулентных добавок, входящих в эти уравнения.

Механизм и принцип работы регулятора рассмотрен в публикациях [4, 6, 7, 8, 10, 11, 12].

Одним из важных процессов является организация возврата части энергии в поток газа из камеры торможения в центральную зону стратифицированного потока в трубе энергоразделения. Для моделирования процесса подогрева входного газа тормозное устройство математически описано с учетом теплопереноса, что является усилительным звеном в реализованной положительной обратной связи по тепловому контуру ИВРД.

Тормозное устройство представляет собой лопаточный венец из тонколистового материала, закрепленный на трубке перепуска потока в приосевую зону.

Наличие тормозного устройства влияет на структуру потока [11]. Основным изменением является поле скоростей в проточной части, картина течения зависит от двух факторов: геометрические характеристики проточной части и термодинамические характеристики входного потока в проточную часть вихревой трубы.

Изменение термодинамических параметров потока влияет на градиенты давлений и температур, что обуславливает эффективность работы вихревой трубы и процесса температурной стратификации потока. Расход и скорость потока влияют на образование и поддержание вихря в проточной части вихревой трубы, а также на скорость его вращения и длину вихревого жгута.

Изменения в геометрических параметрах проточной части, в частности изменения в тормозном устройстве, приводят к разрушению вихря и образованию закрученного потока в межлопаточном пространстве [12]. Закрутка потока в межлопаточном пространстве интенсифицирует теплопередачу между газом и стенками тормозного устройства.

Температура потока, входящего в межлопаточное пространство, и температурная стратификация определяют градиент температур в стенках конструкции тормозного устройства ИВРД и коэффициент усиления положительной обратной связи по тепловому контуру (рис. 2).

Характеристикой структуры потока являются поля распределения давления, которые в результате численного моделирования позволили выявить существенное различие в структуре потока, как например, в случае наличия или отсутствия тормозного устройства, что позволило визуализировать распределение давления в вихревой трубе по характерным изоповерхностям (рис. 3, а, б).

Изоповерхности постоянного давления позволили визуализировать разрушающуюся структуру потока в случае наличия тормозного устройства (рис. 3, а) и в случае отсутствия тормозного устройства – устойчивую винтовую структуру, обладающую закруткой не только в области вихревой трубы, но и в зоне устройства возврата потока (рис. 3, б).

Реализованный контакт между стенкой вихревой трубы и торцевой поверхностью лопасти позволил интенсифицировать процесс теплопередачи и подогрева входного потока и увеличить величину теплового потока от нагретого потока к входному потоку, увеличивая тем самым коэффициент положительной обратной связи.

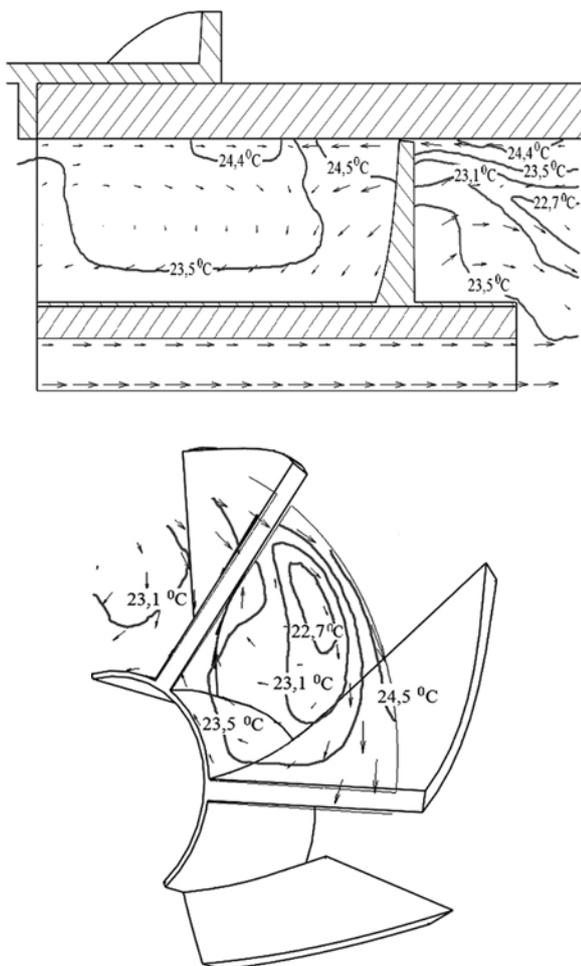


Рис. 2. Изолинии в области межлопаточного пространства

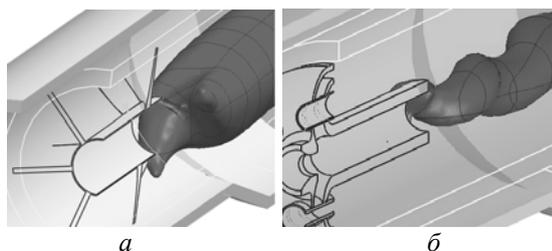


Рис. 3. Структура потока в ИВРД
а – при наличии тормозного устройства,
б – при отсутствии тормозного устройства

Результаты расчетов показывают, что неоднородность потока в проточной части камеры вихревой трубы образует зоны различного градиента температур, тем самым реализуя в проточной части ИВРД зоны с положительной и отрицательной обратными связями одновременно.

Количественная оценка параметров течения может быть произведена только при наличии графических характеристик, что невозможно выполнить на основе градиента цвета, наиболее распространенного способа для качественного определения параметров протекающего процесса (рис. 4). Далее приведены результаты расчета задачи с граничными условиями на входе и выходе из расчетной области: $G_{\text{вх}} = 0,2$ кг/с, $t_{\text{вх}} = 23$ °С, $p_{\text{вх}} = 0,6$ МПа, $p_{\text{хол}} = 0,137$ МПа (противодавление за диафрагмой соответствует нагрузке со стороны потребителя), $p_{\text{вых}} = 0,1$ МПа (атмосферное давление).

Для оценки величины снижения температуры, в результате снижения давления на изотермическом вихревом регуляторе давления газа, было выполнено осреднение результатов численного моделирования и определение среднемассовой температуры. Уравнение баланса относительно среднемассовой температуры:

$$\Sigma G_i \cdot t_i = G_{\Sigma} \cdot t_{\Sigma},$$

$$t_{\Sigma} = \frac{\Sigma G_i \cdot t_i}{G_{\Sigma}},$$

где G_i – расход через проходное сечение с одинаковой скоростью [м³/с], t_i – локальная температура [°С], G_{Σ} – расход через регулятор [м³/с], t_{Σ} – среднемассовая температура [°С],

Осреднение по массе позволило выявить среднестатистическую температуру потока газа в $T_{\text{вых.с.м.}} = 18,5$ °С, что на 0,5 градуса меньше входной температуры $T_{\text{вх}} = 19$ °С и не соответствует известному эффекту.

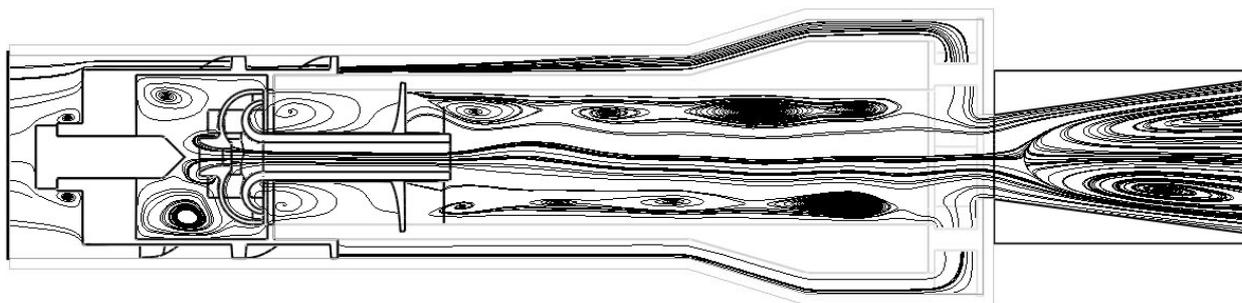


Рис. 4. Проекция линий тока на плоскость симметрии камеры энергоразделения

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике. 2-е изд., перераб. и доп. Самара: Оптима, 1997. 292 с.
2. Пиралишвили Ш. А., Поляев В. М., Сергеев М. Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / под ред. А. И. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
3. Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Р. Х. Мухутдинов, Р. Я. Амиров, Л. Э. Альмеев, М. М. Ханнанов. Уфа: Реактив, 2001. 342 с.
4. Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак, В. А. Целищев, В. Л. Юрьев, П. М. Кармацкий, Ю. М. Ахметов, С. В. Гурин, А. А. Соловьев, Р. Ю. Дистанов // сб. науч. тр. IV Междунар. совещ. по проблемам энергоаккумулирования и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М.: ИМАШ РАН, 2004. С. 133–144.
5. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 800 с.
6. Ахметов Ю. М., Гурин С. В., Целищев В. А. 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.
7. 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.
8. Опыт реализации квазиизотермического редуцирования в вихревых регуляторах давления энергетических систем / Ф. Г. Бакиров, Ю. М. Ахметов, А. А. Соловьев, С. В. Гурин, А. Ю. Пархимович // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9. № 6 (24). С. 3–6.
9. Газизов Р. К., Лукашук С. Ю., Соловьев А. А. Основы компьютерного моделирования технических систем: учеб. пособие Уфа : УГАТУ, 2008. 143 с.
10. Пархимович А. Ю. Имитационное моделирование температурной стратификации закрученных потоков в вихревых хладогенераторах: дис. канд. техн. наук. 2009. 124 с.
11. Ахметов Ю. М. Численное моделирование процессов стратификации в изотермическом вихревом регуляторе с внутренним смешением // Вестник УГАТУ. 2010. Т.10, №14(37).
12. Ахметов Ю. М., Пархимович А. Ю., Свистунов А. В. Численное моделирование процессов температурной стратификации в изотермическом вихревом регуляторе. М.: ИМАШ РАН, 2010. С. 126–141.

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, ассист. 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, ассист. той же каф., магистр каф. прикл. гидромех. (УГАТУ, 2009). Дипл. бак. техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Соловьев Алексей Александрович, ст. преподаватель той же каф., маг. каф. прикл. гидромех. (УГАТУ, 2007). Дипл. бак. техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук по гидравл. машинам (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.

Целищев Владимир Александрович, проф. той же каф. Дипл. инж.-мех. по гидравл. Машинам (УГАТУ, 1982). Д-р техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. систем автоматики ЛА и двигательных установок.

Чиндина Александра Александровна, магистрант той же каф. Дипл. бак. техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2010). Иссл. в обл. газогидр. течений и систем упр. энерг. установок.