

УДК 621.6

**Ф. Г. БАКИРОВ, Ю. М. АХМЕТОВ, А. А. СОЛОВЬЕВ, С. В. ГУРИН,
А. Ю. ПАРХИМОВИЧ****ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ КВАЗИИЗОТЕРМИЧЕСКОГО
РЕДУЦИРОВАНИЯ В ВИХРЕВЫХ РЕГУЛЯТОРАХ ДАВЛЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассматривается актуальная проблема обмерзания магистральных газопроводов и выпадения кристаллогидратов при дросселировании природного газа на газораспределительных пунктах. Представлены обобщенные результаты работ по созданию квазиизотермических вихревых регуляторов давления газа. Приведены результаты численного моделирования внутренних гидравлических и термодинамических процессов. *Природный газ; вихревая труба; дросселирование; математическая модель; численное моделирование; газодинамика; термодинамика*

В настоящее время транспортировка и хранение газовых сред осуществляется под большими давлениями, что позволяет в ограниченном объеме трубопровода или баллонной системы пропускать или хранить большее количество газа за счет его сжатия. Однако по условиям технологического процесса, как правило, требуются более низкие давления газа, что вызывает необходимость установки специальных устройств для редуцирования давления до потребительского уровня. Такие устройства, предназначенные для снижения давления в газовых сетях и поддержания входного или выходного давления газа на заданном уровне независимо от отбора газа потребителями, называются регуляторами давления газа [1].

В 2001 г. в УГАТУ в рамках выполнения работ по федеральной целевой программе «Интеграция» были начаты работы по разработке теоретических и методологических основ создания энергосырьевых комплексов на основе вихревого эффекта для утилизации энергии давления магистральных газопроводов. По заказу газоснабжающих организаций (ООО «Баштрансгаз» и ОАО «Тюменьнефтегаз») в отдельное направление работ были выделены разработка и создание вихревых регуляторов давления газа (ВРДГ), предназначенных для квазиизотермического редуцирования давления газа. Заинтересованность газоснабжающих организаций к созданию ВРДГ связана со снижением температуры природного газа при его редуцировании на газораспределительных станциях (ГРС) и га-

зорегуляторных пунктах (ГРП) при использовании существующих регуляторов давления, в которых для снижения давления газа создается переменное регулируемое гидравлическое сопротивление потоку газа. Наблюдаемое снижение температуры при дросселировании газа связано с проявлением дроссель-эффекта Джоуля-Томсона. Это приводит к переохлаждению газового потока, обмерзанию трубопроводов, арматуры и распределительных устройств, а также к образованию кристаллогидратов. Образовавшиеся гидраты создают пробки в трубопроводах и отлагаются на деталях регуляторов, что приводит к примерзанию затворов к седлам, закупориванию проходных сечений регуляторов давления, образованию гидратных пробок в импульсных линиях обвязки регуляторов, что снижает надежность работы и может привести к возникновению аварийных ситуаций.

Проведенный анализ характеристик получаемой температуры смешения результирующих потоков на выходах вихревой трубы по результатам экспериментов [3, 4] показал, что при определенных условиях вполне вероятно получение процесса дросселирования, близкого к изотермическому. При проведении серии экспериментов по исследованию газодинамических процессов в вихревой трубе было подтверждено, что при смешении «холодного» и «горячего» потоков, получаемых после температурного и массового разделения, возможно получение более высокой температуры результирующего потока, чем при дроссе-

лировании, в соответствии с эффектом Джоуля-Томсона.

Полученные результаты легли в основу разработки первого экспериментального образца ВРДГ на базе вихревой трубы (ВТ) с полым внутренним смесением потока. Закручивающее устройство представляет собой регулируемый двухсопловой ввод прямоугольного сечения, максимальное открытие которого соответствует рекомендации [2], по выбору отношения ширины к высоте как 2:1.



Рис. 1. Экспериментальный образец вихревого регулятора давления газа

На рис. 1 представлен экспериментальный образец ВРДГ, а на рис. 2 — поперечный разрез данного регулятора. Описание регулятора, принцип его работы и полученные результаты представлены в ранее опубликованных работах авторов [5, 7, 8, 10]. Все эксперименты проводились на газодинамическом стенде УГАТУ с использованием воздуха.

Обработка полученных результатов показала, что ΔT — значение разницы между температурой потока на выходе регулятора и на входе в регулятор больше или равное нулю, наблюдается для данной конструкции регулятора только при входном давлении газа до 1,2 МПа. Также была выявлена зависимость температуры газа на выходе из регулятора от геометрии соплового ввода. С увеличением площади критического сечения соплового ввода наблюдалось снижение температуры газа на выходе из регулятора.

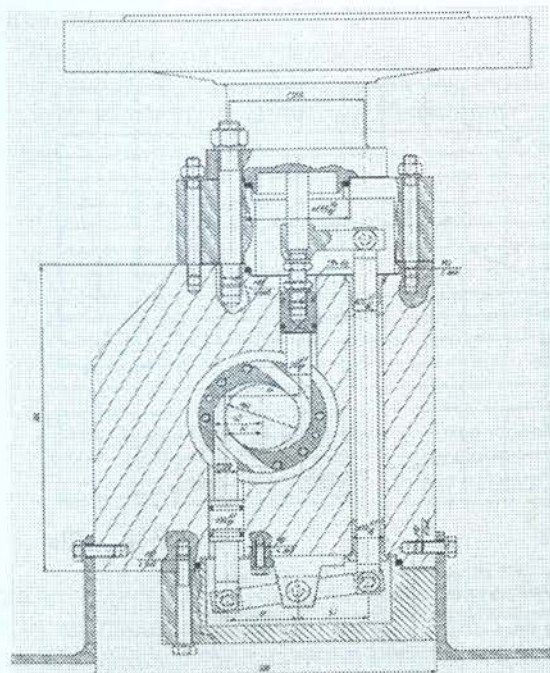


Рис. 2. Поперечный разрез регулятора

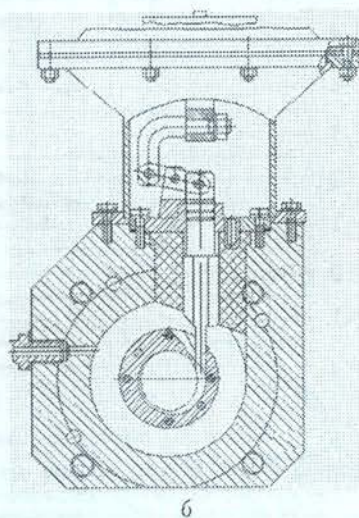
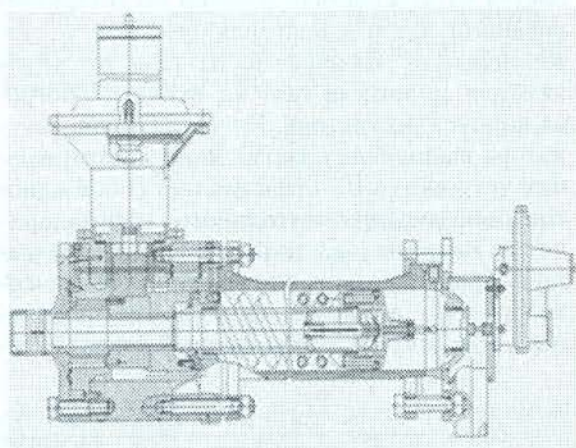


Рис. 3. Продольный и поперечный разрез ВРДГ для ГРП

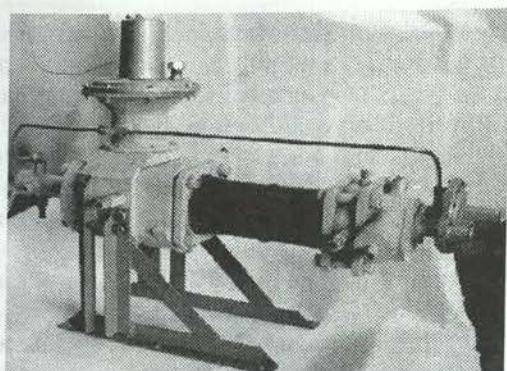


Рис. 4. Экспериментальный образец ВРД для ГРП

С учетом полученных результатов и выявления характера влияния различных факторов на термогазодинамические характеристики регулятора, специально для использования на ГРП с входным давлением до 0,6 МПа, был спроектирован ВРД с фазоотделением [9]. Особенностью данного регулятора является возможность отделения несанкционированной влаги в поступающем газе, а также перепуск горячей части газа по трубкам для подогрева газа на входе и обогрева корпуса регулятора. Внешняя труба регулятора выполнена пластиковой, закручивающее устройство ВТ представляет собой односопловой ввод прямоугольного сечения, причем за максимально открытое положение было выбрано соотношение его ширины к высоте как 8:1. На рис. 3,а представлен продольный, а на рис. 3,б — поперечный разрез регу-

лятора. На рис. 4 представлен внешний вид регулятора.

Данный экспериментальный образец ВРД с фазоотделением прошел испытания на сжатом воздухе на газодинамическом стенде УГАТУ и на природном газе в ОАО «Тюменьскрайгаз» на резервной питке ГРП «Ушаково». Результаты испытаний регулятора на воздухе и природном газе представлены на рис. 5.

Анализ показывает, что при работе ИВРД на сжатом воздухе наблюдается повышение температуры, при избыточном давлении $P = 0,3$ МПа, на $\Delta T = +3,0^\circ\text{C} \div +5,0^\circ\text{C}$, а на природном газе повышение температуры составляет $\Delta T = +1,0^\circ\text{C} \div +2,5^\circ\text{C}$, относительно температуры на входе в регулятор. Разница в степени подогрева на воздухе и на природном газе объясняется теплофизическими свойствами газа, что отмечается и другими исследователями [2, 4]. Увеличение степени открытия соплового ввода приводит к уменьшению значения ΔT , а рост давления от 0,1 до 0,4 МПа ведет к росту ΔT .

Наряду с экспериментальными работами проведены работы по численному моделированию газодинамических процессов в вихревых регуляторах с помощью CFD пакета CosmosFloWorks. Пакет CosmosFloWorks предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики.

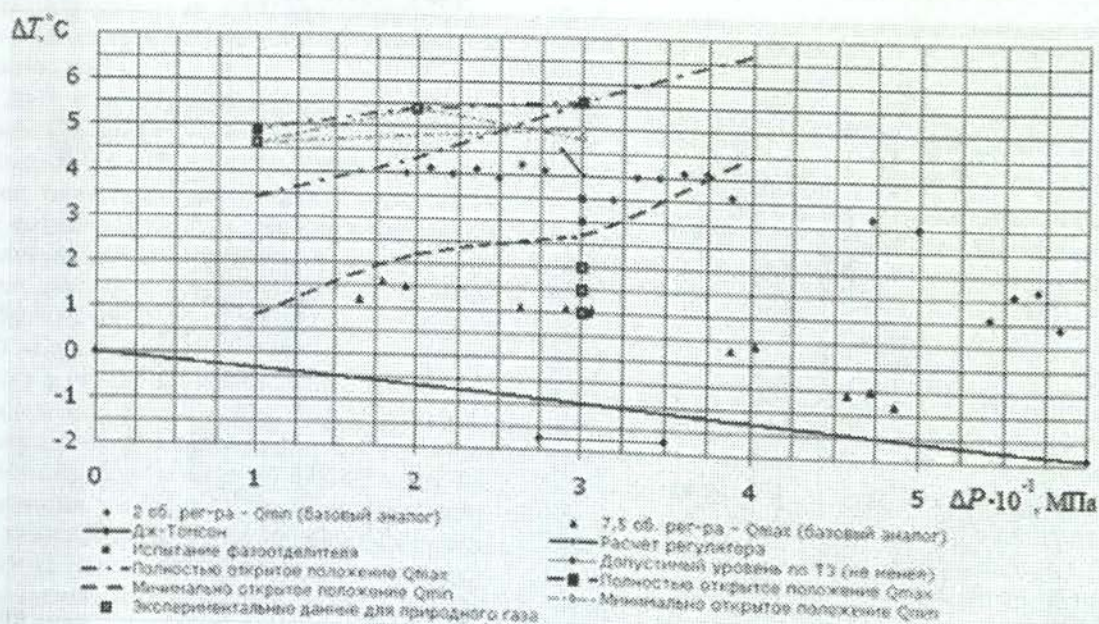


Рис. 5. Результаты испытаний ВРД для ГРП

Моделируемые течения включают в себя стационарные и нестационарные, сжимаемые и несжимаемые потоки многокомпонентных текучих сред в каналах и/или вокруг тел, с учетом гравитации, пограничного слоя, в том числе с учетом шероховатости стенок, с теплообменом между текучей средой и твердым телом. Использование различных моделей турбулентности и адаптивной расчетной сетки позволяет моделировать сложные движения жидкости, включая течения с сильной закруткой и теплообмен между потоком и стенкой.

В COSMOSFloWorks движение и теплообмен текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Для моделирования турбулентных течений упомянутые уравнения Навье-Стокса осредняются по Рейнольдсу, т. е. используется усредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения усредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры) учитываются введением соответствующих производных по времени. В результате уравнения имеют дополнительные члены — напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания этой системы уравнений используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках $k\varepsilon$ модели турбулентности.

Уравнения сохранения массы, количества движения и энергии в Декартовой системе координат могут быть записаны следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_k)}{\partial x_k} &= 0; \\ \frac{\partial \rho \cdot u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot (\rho \cdot u_i \cdot u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} &= S_i; \\ \frac{\partial(\rho \cdot E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot ((\rho \cdot E + P) \cdot u_k + q_k - \tau_{ik} \cdot u_i) &= \\ &= S_k \cdot u_k + Q_H, \end{aligned}$$

где u — скорость жидкости, ρ — плотность, S_i — внешняя массовая сила на единицу массы, E — полная энергия на единицу массы, Q_H — тепловой источник на единицу объема, τ_{ik} — тензор вязкостных касательных напря-

жений, q_i — утечка тепла, и индекс i — указывает на суммирование выражений по всем трем координатным осям.

Следуя допущению Буссинеска, касательные напряжения для Ньютоновских жидкостей определяются в данной модели следующим образом:

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

где $\mu = \mu_l + \mu_t$;

δ_{ij} — дельта-функция Кронекера, равная единице при $i = j$, или нулю в любом другом случае;

μ_l — динамическая вязкость;

μ_t — турбулентная вязкость;

k — турбулентная кинетическая энергия.

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

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \cdot \rho \cdot k^2}{\varepsilon}.$$

Здесь f_μ — показатель турбулентной вязкости, определяемый из выражения:

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

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

Два дополнительных уравнения переноса используются для описания турбулентной кинетической энергии и диссипации:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \cdot k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_k \cdot k)}{\partial x_k} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_k} \cdot \left((\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k}) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \\ \frac{\partial \rho \cdot \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \cdot u_k \cdot \varepsilon)}{\partial x_k} &= \\ &= \frac{\partial}{\partial x_k} \cdot \left((\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon, \end{aligned}$$

где члены уравнения S_k и S_ε определяются как

$$S_k = \tau_{ij}^R \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \cdot \varepsilon + \mu_t \cdot P_B,$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot (f_1 \cdot \tau_{ij}^R \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \mu_t \cdot C_B \cdot P_B) - C_{\varepsilon 2} \cdot f_2 \cdot \frac{\rho \cdot \varepsilon^2}{k}$$

Здесь P_B представляет возникновение турбулентности вследствие воздействия выталкивающих сил и может быть записан как

$$P_B = -\frac{g_i}{\sigma_B} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i},$$

где g_i — проекция вектора ускорения свободного падения в направлении x_i , σ_B — константа, равная $\sigma_B = 0,9$.

C_B — константа, определяемая следующим образом: при $P_B > 0$, $C_B = 1$, в других случаях $C_B = 0$.

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

$$f_2 = 1 - e^{-R_T^2}.$$

Константы C_μ , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k , σ_ε определены эмпирически.

$$C_\mu = 0,09; \quad C_{\varepsilon 1} = 1,44; \quad C_{\varepsilon 2} = 1,92;$$

$$\sigma_k = 1; \quad \sigma_\varepsilon = 1,3.$$

Диффузионная утечка тепла определяется как

$$q_k = -\left(\frac{\mu_l}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_c} \right) \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad k = 1, 2, 3.$$

Здесь σ_c — константа, равная $\sigma_c = 0,9$;

Pr — число Прандтля;

c_p — теплоемкость при постоянном давлении.

Эти уравнения описывают и ламинарный и турбулентный потоки. Параметры k и μ_t равны нулю для ламинарного течения. Теплообмен в жидкостях описывается уравнением сохранения энергии, где утечка тепла определяется в $k\varepsilon$ модели турбулентности.

Для описания потока в пристеночных областях используется модель пограничного слоя. Модель основана на так называемом MWF (модифицированные функции стенки) приближении. Модель используется для того, чтобы охарактеризовать ламинарный и турбулентный потоки близ стенок и описать переходы из ламинарного к турбулентному течению и наоборот. Модель предоставляет значения скоростей и температур в пограничных областях уравнениям сохранения.

Система уравнений Навье—Стокса должна быть дополнена выражениями, определяющими теплофизические свойства жидкости. Предусматривается моделирование потоков газа с плотностью, вязкостью, теплопроводностью и теплоемкостью как функций температуры.

Уравнение состояния: $\rho = \rho(p, T, y)$.

Для газовых потоков применяется уравнение состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T}.$$

Для учета сжимаемости газа, плотность может определяться по одной из следующих зависимостей:

1. Степенная зависимость

$$\rho = \rho_0 / \left(1 - C \cdot \ln \frac{B + P}{B + P_0} \right),$$

где ρ_0 — плотность жидкости при давлении P_0 ;

C, B — коэффициенты;

ρ_0, C, B зависят от температуры;

P — расчетное давление.

2. Логарифмическая зависимость

$$\rho = \rho_0 / \left(\frac{B + P}{B + P_0} \right)^{\frac{1}{n}},$$

где n — показатель степенной зависимости плотности от температуры.

Для моделирования использована твердотельная модель проточной части экспериментального образца регулятора, представленная на рис. 6. На стенках задается граничное условие «Адиабатическая стенка». На входе и выходе задавались граничные условия по статическим давлениям и температуре, соответствующие экспериментальным данным. Турбулентность моделировалась с помощью стандартной $k\varepsilon$ модели для высоких чисел Рейнольдса.

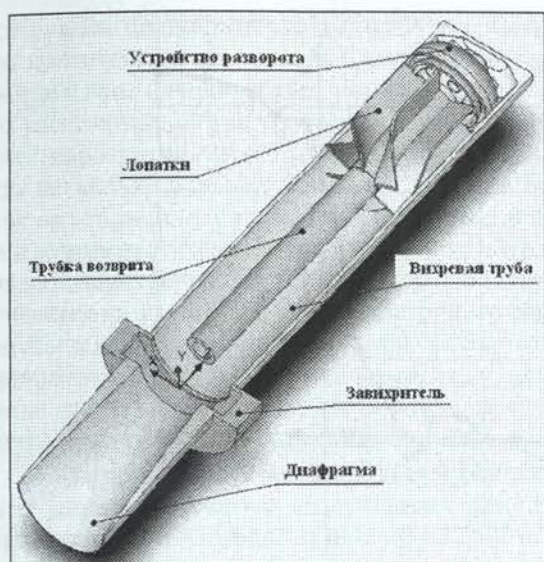


Рис. 6. Расчетная модель проточной части регулятора

Особенностью представленного регулятора является наличие в вихревой трубе крестовины, состоящей из профилированного лопаточного венца, устройства разворота, и трубки возврата. Профилированные лопатки обеспечивают безударное выпрямление закрученного потока и его плавный ввод в устройство разворота, обеспечивающее торможение и разворот газа. Далее часть горячего потока по центральной трубке возврата перетекает к диафрагме, повышая температуру в сопловом сечении. Вторая часть потока возвращается к сопловому сечению по внешнему каналу, обтекая снаружи поверхность трубки возврата, и в отличие от внутреннего потока участвует в процессе теплообмена со свободным вихрем.

На рис. 7 с помощью векторов представлена картина течения газа в завихрителе, которая показывает наличие прямого свободного вихря, обратного вынужденного вихря и потока газа через трубку.

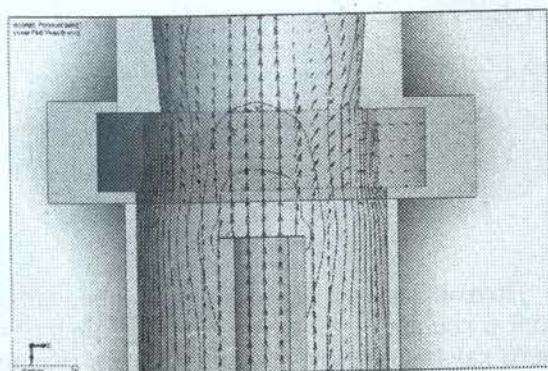


Рис. 7. Вектора скоростей и изолинии давлений на выходе из трубки возврата

Представленная картина распределения скоростей реализуется распределением давлений, представленным на рис. 8 изолиниями. Данный рисунок также подтверждает предположение многих исследователей [2, 3, 4, 6, 7] о наличии центральной зоны разряжения. Рис. 8 демонстрирует направление движения газа и изолинии давлений. На рис. 9 с помощью линий тока можно увидеть дробление вихревого движения в крестовине по межлопаточным секторам.

На рис. 10 представлено поле распределения полных температур по осевому сечению регулятора. Интерес представляет повышение температуры практически на 25 градусов в камере торможения регулятора за устройством разворота.

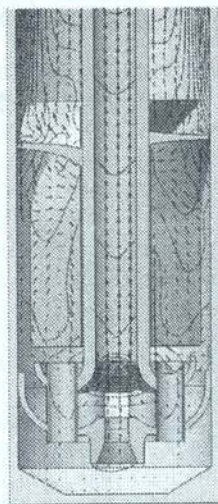


Рис. 8. Вектора скоростей и изолинии давлений в крестовине

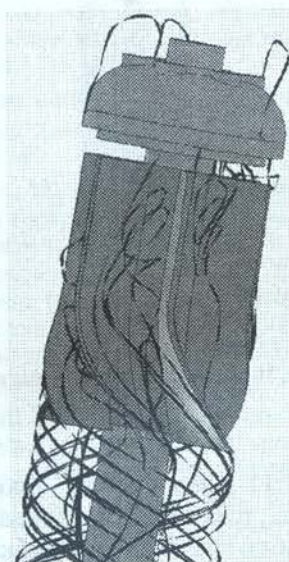


Рис. 9. Линии тока в крестовине

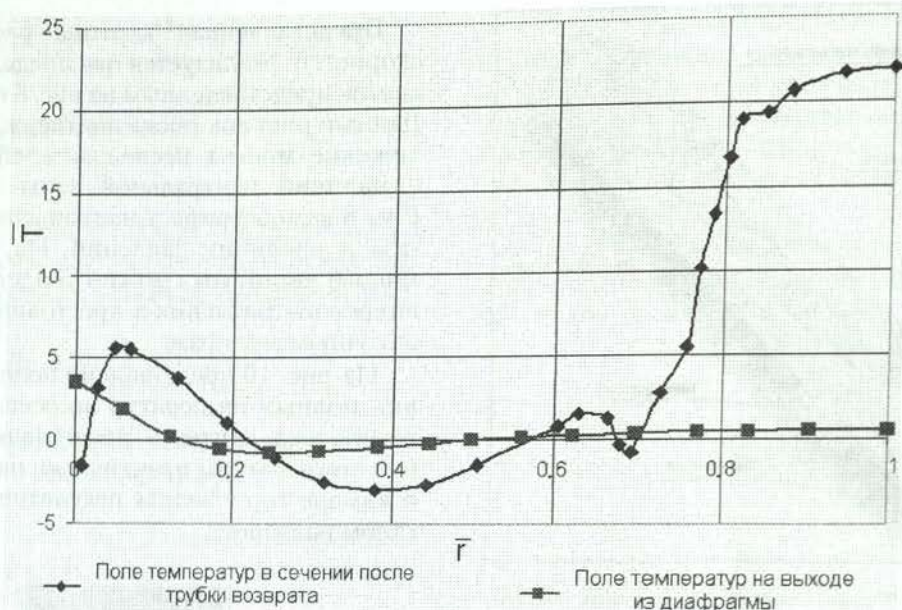


Рис. 11. Распределение полных температур как функция от безразмерного радиуса ($\bar{r} = 1$ соответствует центру, $\bar{r} = 0$ — стенке)

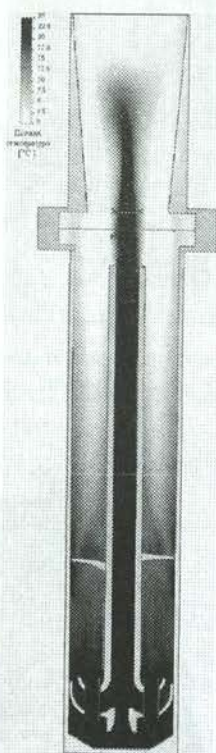


Рис. 10. Поле полной температуры

На рис. 11 представлена эпюра полной температуры газа. Первая кривая соответствует сечению на выходе из трубки возврата, в котором потоки еще не успели перемешаться.

Вторая кривая представляет эпюру потока на выходе из диафрагмы, после полного перемешивания потоков. Данный график подтверждает возможность получения изотермического снижения давления газа, так как на входе в регулятор температура задавалась равной 0°C , а среднemasовая температура газа на выходе, судя по второй кривой, будет составлять порядка 0°C .

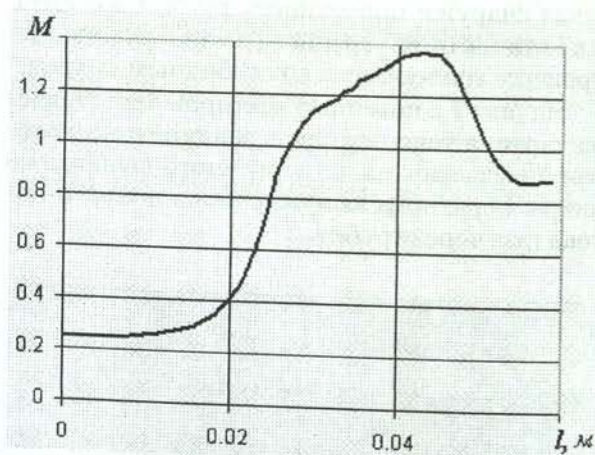


Рис. 12. Распределение числа Маха по длине канала

Другой задачей было определение скоростей в сошловом сечении по длине подводящего канала. На рис. 12 представлен график изменения числа Маха по длине канала. На длине 0,015 м регулируемые клинья начина-

ют сужать подводной канал, разгоняя поток до критических скоростей. Самое узкое геометрическое сечение (срез сопла) находится на расстоянии 0,03 метра, однако, критика, за счет нарастания пограничного слоя, «садится» несколько раньше. После среза сопла поток расширяется до скоростей порядка 1,4 М, после чего практически сразу скорость потока падает, через серию косых скачков, и устанавливается на уровне 0,9 М. На данный момент изучается характер течения при различных положениях регулирующих клиньев, и влияние сверхзвуковой области течения на процесс энергетического разделения.

По результатам анализа экспериментальных данных с учетом полученных результатов численного моделирования разработан вихревой регулятор давления газа, для использования в составе газораспределительного пункта ВРДГ-3 [6]. В регуляторе имеется фазоотборное устройство для отбора несанкционированной влаги и трубка переноса горячего потока на обогрев регулятора.

3D-вид разработанного регулятора представлен на рис. 13 и 14. Для сохранения постоянного положения критического сечения сопловой введ выполнен двухсопловым с регулируемыми поворотными лопатками.

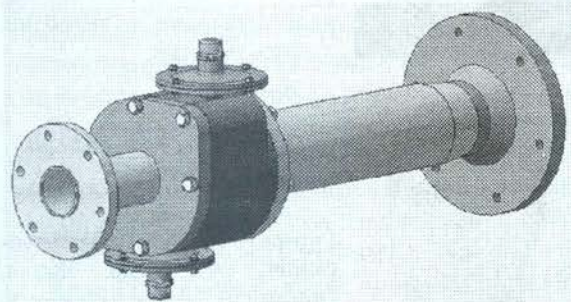


Рис. 13. Общий 3D-вид вихревого регулятора в сборе

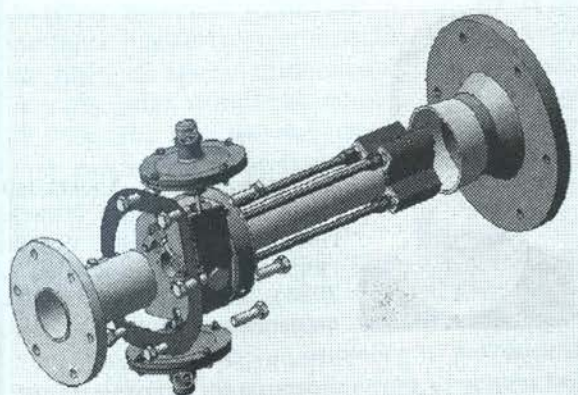


Рис. 14. 3D-вид внутреннего устройства вихревого регулятора

Разрабатываемый вихревой регулятор представляет собой гидропневмоагрегат, в котором для поворота допатонок предусмотрена пневмогидравлическая система регулирования. Она позволяет значительно упростить кинематику синхронизации движения поворотных лопаток и снизить влияние трения в механизме синхронизации.

На регулятор подготовлен полный комплект конструкторской документации. Разработанная конструкция регулятора предположительно позволит осуществлять квазиизотермический процесс снижения давления газа на любых режимах его работы и обеспечит необходимую точность и надежность регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Плотников, В. М.** Регуляторы давления газа / В. М. Плотников, В. А. Подрешетников, А. П. Дроздов [и др.]. Л.: Недра, 1982. 125 с.
2. **Меркулов, А. П.** Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. М.: Машиностроение, 1969. 292 с.
3. **Мухутдинов, Р. Х.** Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Р. Х. Мухутдинов, Р. Я. Амиров, Л. Э. Альмеев [и др.]; под ред. Я. С. Амирова. Уфа: Реактив, 2001. 347 с.
4. **Пиралишвили, Ш. А.** Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под ред. А. И. Леонтьева. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
5. **Патент на изобр. № 2237918 РФ.** Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты) / Институт технологии и организации производства. Приор. от 19.05.2003.
6. **Патент на изобр. № 2282285 РФ.** Вихревой регулятор давления газа. Оpubл. 27.08.2006. Бюл. № 24.
7. **Русак, А. М.** Редуцирование давления природного газа без устройств предварительного подогрева / А. М. Русак, В. А. Целищев, В. Л. Юрьев [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.
8. **Русак, А. М.** Разработка изотермического регулятора давления для редуцирования магистрального газа без подогрева на ГРС / А. М. Русак, В. Л. Юрьев, Ю. М. Ахметов [и др.]; под ред. В. Л. Юрьева // Наука — производству. 45 лет на пути технического прогресса: ежегодн. науч.-техн. сб. Уфа: Гилем, 2003. С. 78–83.

9. **Русак, А. М.** Использование особенностей вихревых течений для получения квази-зотермического процесса дроселирования давления природного газа / А. М. Русак, В. Л. Юрьев, Ю. М. Ахметов [и др.] // Проблемы машиноведения и критических технологий в машиностроительном комплексе РБ : сб. науч. тр. АИ РБ. Уфа : Гилем, 2005. С. 37–49.
10. **Соловьев, А. А.** Исследование возможности получения изотермического процесса дроселирования в вихревом регуляторе давления газа / А. А. Соловьев, С. В. Гурин // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 8, № 1 (17). С. 3–6.

ОБ АВТОРАХ



Бакиров Федор Гайфуллович, проф., зав. каф. теории авиац. и ракетн. двиг. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1969). Д-р техн. наук по тепл. двиг. ЛА (УГАТУ, 1995). Иссл. в обл. авиадвигателестроения, ракетн. двиг., энергоустановок, проблем энергосбережения.



Ахметов Юрий Мавлютович, доц. каф. прикл. гидромех., зам. ген. дир. ПИИТ. 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.



Соловьев Алексей Александрович, асп. каф. авиац. теплотехн. и теплоэнергет. Дипл. магистр техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2005). Готовит дис. в обл. газодин. и термодин. закруч. потоков.



Гурин Сергей Владимирович, асп. каф. прикл. гидромех. Дипл. инж.-мех. по тепл. электр. станциям (УГАТУ, 2004). Готовит дис. в обл. энергосберег. технол.



Пархимович Александр Юрьевич, асп. каф. прикл. гидромех. Дипл. инж.-мех. по гидравл. машинам (УГАТУ, 2004). Готовит дис. в обл. вихревых течений.