

УДК 621.6

С. В. ГУРИН, А. А. СОЛОВЬЕВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРИ ДРОССЕЛИРОВАНИИ В ВИХРЕВОМ РЕГУЛЯТОРЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

Рассматривается возможность получения изотермического процесса при дросселировании газа в устройстве – вихревом регуляторе давления газа, – принцип работы которого основан на вихревом эффекте. Приведены характеристики разработанного регулятора и результаты, полученные при экспериментах на сжатом воздухе. *Вихревая труба; вихревой эффект; дросселирование газа; эффект Джоуля–Томсона, регулятор давления газа*

ВВЕДЕНИЕ

В России, в силу ее географических особенностей и сложившихся технологий, превалирует газопроводный транспорт природного газа. Транспортирование природного газа осуществляется по магистральным газопроводам, который к населенным пунктам и промышленным объектам поступает с избыточным давлением 4,0–7,5 МПа, что вызывает необходимость установки дополнительных сооружений для понижения давления до потребительского уровня: газораспределительные станции (ГРС) и газорегуляторные пункты (ГРП).

Обычно снижение давления (редуцирование) газа производится путем его дросселирования через узкие сечения редуцирующих устройств, где потенциальная энергия расходуется на трение и преодоление сопротивления тракта и безвозвратно рассеивается в окружающем пространстве. При дросселировании газа его объем увеличивается (при этом процесс протекает при постоянной энтальпии $i = \text{const}$), и на преодоление сил межмолекулярного притяжения необходимо затратить определенную энергию, которая пойдет на увеличение потенциальной энергии взаимодействия молекул. Частично эта энергия покрывается за счет снижения кинетической энергии теплового движения молекул газа, в результате чего температура газа снижается. Снижение температуры при дросселировании характеризуется дифференциальным температурным эффектом дросселирования (положительный эффект Джоуля – Томсона). Для природного газа его величина составляет 5,5 град/МПа, что при редуцировании давления природного газа на ГРС приводит к снижению его температуры на 20 – 25°C. При этом создаются благоприятные условия для образования кристаллогидратов. Кристаллогидраты природных газов внешне похожи на мокрый спрессованный снег, переходящий в лед. Образовавшиеся гидраты создают пробки в трубопроводах и отлагаются на деталях регуляторов, что приводит к примерзанию затворов к седлам, закупориванию проходных сечений регуляторов давления и образованию гидратных пробок в импульсных линиях обвязки регуляторов [1, 2].

Для исключения выпадения гидратов при расширении и охлаждении газа в настоящее время применяются два основных способа:

1. Предварительный подогрев газа, который выполняется за счет сжигания части транспортируемого газа (0,08–0,2 %) и передачи получаемой тепловой энергии основному потоку в специальных теплообменниках с выбросом продуктов сгорания в атмосферу. При этом, кроме непосредственных затрат природного газа на сжигание, возникает необходимость усложнения технологической цепочки на ГРС установкой специальных дорогостоящих котлов – подогревателей, которые ухудшают экологическую обстановку продуктами сгорания.
2. Ввод в поток газа антигидратных ингибиторов: метанола, этиленгликоля, диэтиленгликоля, триэтиленгликоля, этилкарболита или электролитов в виде растворов хлористого кальция, поваренной соли, хлористого лития или аммиака. Наиболее распространен способ ввода метанола в поток газа. При этом метанол образует с жидкой влагой спиртовые смеси, температура замерзания которых значительно ниже нуля. Пары воды поглощаются из газа, что значительно снижает точку росы, и, следовательно, создаются условия для разложения гидратов или для предупреждения их образования. Недостатком данного способа является высокая стоимость ингибиторов.

Возможным решением проблемы выпадения гидратов, обмерзания регуляторов и отводящих газопроводов с одновременным снижением эксплуатационных затрат по сравнению с существующими методами, является создание и использование изотермического вихревого регулятора давления газа. Принцип работы регулятора основан на вихревом эффекте, для работы он не требует постороннего источника энергии и предварительного подогрева входного газа высокого давления.

1. ОПИСАНИЕ РАЗРАБОТАННОГО ОБРАЗЦА ВИХРЕВОГО РЕГУЛЯТОРА ДАВЛЕНИЯ ГАЗА

Внешне простой вихревой эффект на самом деле включает в себе сложный газодинамический процесс, происходящий в пространственном турбулент-

ном потоке вязкого сжимаемого газа. Вихревой эффект возникает в турбулентном потоке вязкого сжимаемого газа, имеющем градиент статического давления по нормали к направлению основного движения. Градиент статического давления может быть обусловлен гравитационным, инерционным, электрическим или магнитными полями. В настоящее время теоретические исследования вихревого эффекта, как правило, основываются на рассмотрении динамического взаимодействия между слоями закрученного потока газа [3]. Вихревые течения газов (жидкостей) могут существенно менять картину происходящего, поэтому использование вихревых аппаратов позволяет создавать системы и установки с качественно новыми характеристиками. На ранней стадии развития вихревых аппаратов основной целью их использования была утилизация перепадов давлений существующих технологических процессов. Сейчас преобладают такие случаи применения, когда без включения в систему вихревого аппарата невозможно или нерационально решать поставленную техническую задачу. В таких случаях вихревой аппарат является не вспомогательным, а одним из главных агрегатов системы или установки. На современном уровне развития вихревых аппаратов возросла актуальность исследований, направленных на углубленное изучение процессов, совершенствование конструкции и технологии изготовления отдельных узлов.

Как известно, вихревая труба представляет собой газодинамическое устройство с тангенциальным входом газа. Если через тангенциальное сопло ввести внутрь трубы сжатый газ, то последний образует интенсивное круговое течение, приосевые слои заметно охлаждаются и вытекают через отверстие диафрагмы в виде холодного потока, а периферийные слои подогреваются и вытекают через дроссель, образуя горячий поток. Интенсивность энергетического разделения газов в вихревой трубе оценивают по зависимости величин избыточных температур газа ΔT_X и ΔT_Γ от доли охлажденного потока μ . При этом

$$\Delta T_X = T^* - T_X, \quad \Delta T_\Gamma = T_\Gamma - T^*, \quad \mu = \frac{M_X}{M^*},$$

где T^* , T_X , T_Γ – температура торможения на входе в вихревую трубу и на выходе из нее охлажденного и горячего потоков соответственно; M^* и M_X – массовые расходы исходного и охлажденного потоков газа соответственно.

При решении проблемы снижения температуры газа при его редуцировании, авторами были проработаны возможности использования вихревой техники для изотермического редуцирования газа. Экспериментальные исследования проводились на воздухе на разработанном образце вихревого регулятора давления газа, представленном на рис. 1.

В основе представленного регулятора [4] лежит вихревая труба длиной $L = 6D$ (D – внутренний

диаметр трубы), внутри которой установлена специально разработанная крестовина обратного тока, исследования которой приведены в работах [5, 6, 7]. Вихревой регулятор работает в режиме $\mu=1$ и в нем предусмотрен предварительный подогрев входного газа от горячей стенки самой вихревой трубы. Закручивающее устройство вихревой трубы представляет собой регулируемый двухсопловой ввод. Эксперименты проводились при разной степени его открытия, осуществляемого посредством движения регулирующих клиньев, на режимах 2; 5; 7,5 оборотов винта (1 оборот винта $\approx 10\%$ площади проходного сечения). Максимальное открытие – 10 оборотов, что соответствует размеру прямоугольных сопел 20×10 мм. Сопловой ввод регулировался посредством изменения высоты сопла от 0 до 10 мм при фиксированной ширине 20 мм.



Рис. 1. Экспериментальный образец вихревого регулятора давления газа

Изменение положения регулирующих клиньев при различных оборотах регулировочного винта представлено на рис. 2.

В проведенном цикле экспериментов входное давление воздуха составляло 0,6; 1,2; 2,4 МПа, а степень расширения потока в вихревой трубе $\Pi = P_{\text{вх, ата}}/P_{\text{вых, ата}} = 1,5 \div 12$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Массивы полученных экспериментальных данных были обработаны с помощью программных пакетов MS Excel и Mathcad и представлены в виде графиков на рис. 3–5. Для отображения полученных результатов используются следующие системы координат. Первая – зависимость подогрева газа $\Delta T = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$ от степени расширения в ВТ $\Pi = P_{\text{вх, ата}}/P_{\text{вых, ата}}$; вторая – зависимость по-

догрева газа $\Delta T = T_{\text{ВЫХ}} - T_{\text{ВХ}}$ от величины расширения $\Delta P = P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}}$.

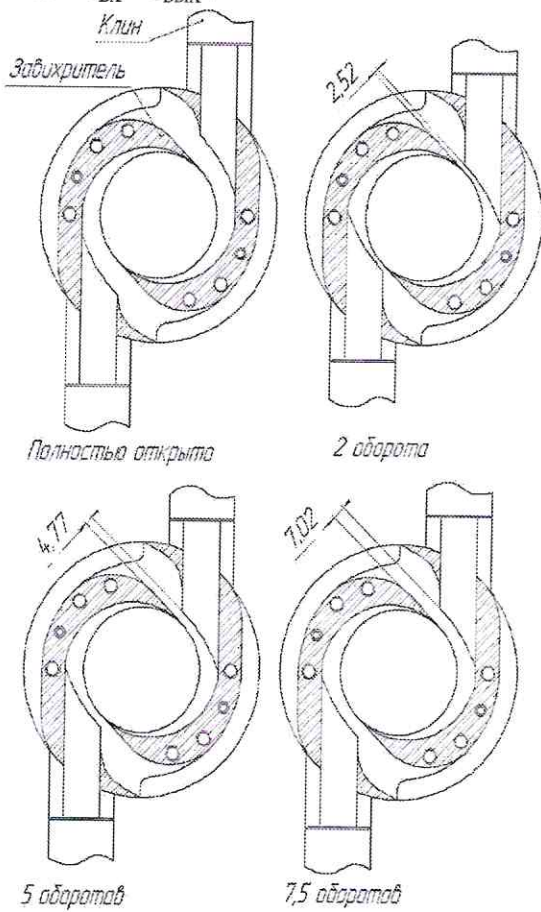


Рис. 2. Изменение положения регулирующих клиньев при различных оборотах регулировочного винта

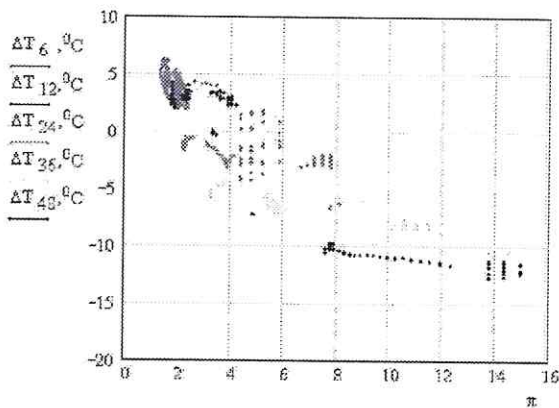


Рис. 3. Массив экспериментальных данных в температурном интервале при разном входном давлении в зависимости от степени расширения

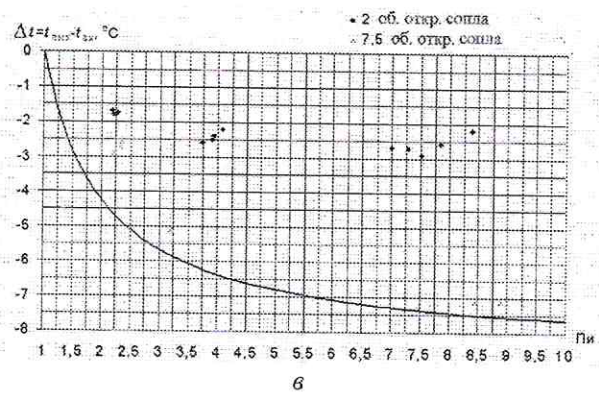
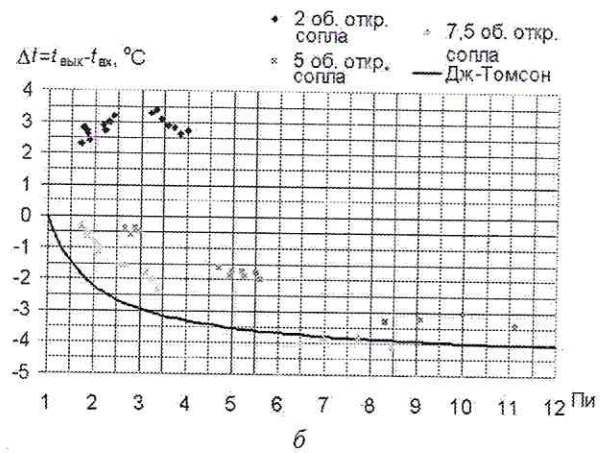
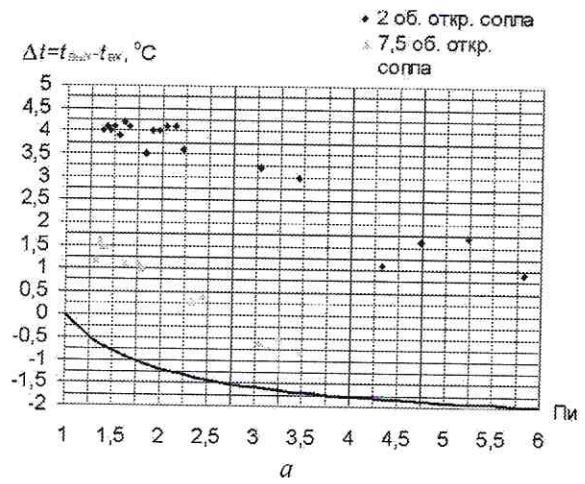


Рис. 4. Зависимость пологорева газа от степени расширения в вихревом регуляторе при различном открытии соплового ввода вихревой трубы при $a - P_{\text{вх}} = 0,6 \text{ МПа}$, $b - P_{\text{вх}} = 1,2 \text{ МПа}$, $в - P_{\text{вх}} = 2,4 \text{ МПа}$

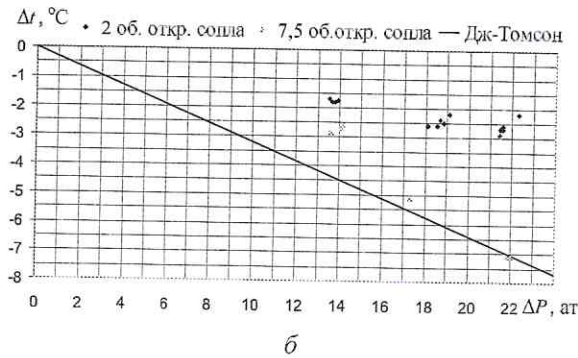
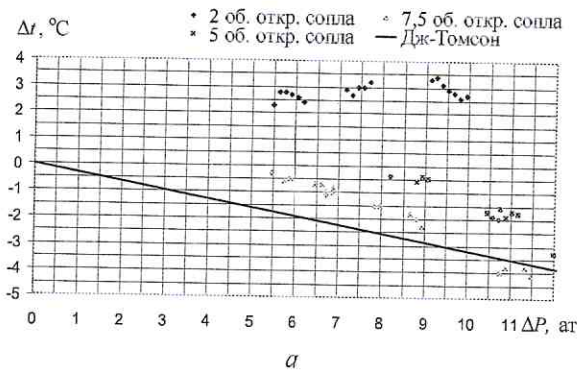


Рис. 5. Зависимость подогрева газа от величины расширения в вихревом регуляторе при различном открытии соплового ввода вихревой трубы при $a - P_{вх} = 1,2$ МПа, $b - P_{вх} = 2,4$ МПа

ВЫВОДЫ

Анализ результатов показывает, что на всех входных давлениях наблюдается зависимость температуры на выходе из регулятора от количества оборотов регулировочного винта определяющего геометрию соплового входа в вихревую трубу. При испытаниях в интервале давления на входе в регулятор до $1,2 \div 1,5$ МПа наблюдается квазиизотермический режим дросселирования давления при всех положениях регулирующих клиньев. Изучение влияния степени расширения показывает, что оптимум величины Π лежит в интервале $\Pi = 2,5 \div 3,5$. Дальнейшее увеличение степени расширения приводит к снижению относительного эффекта подогрева газа и при $\Pi > 10$ наблюдается температура потока газа, соответст-

вующая температуре, наблюдаемой при эффекте Джоуля-Томсона.

Таким образом следует вывод, что с помощью вихревого эффекта возможно создать условия, при которых эффект Джоуля-Томсона изменяет свою величину в рассматриваемом диапазоне значений температур и давлений, что представляет большой практический интерес для науки и техники. В настоящее время разрабатывается более совершенная конструкция регулятора, которая предположительно позволит осуществлять изотермический процесс редуцирования давления газа на любых режимах его работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ионин, А.А.** Газоснабжение: учебник для вузов / А.А. Ионин. М.: Стройиздаг, 1975. 439 с.
2. **Чайцын, Г. А.** Эксплуатация газораспределительных станций магистральных газопроводов / Г.А.Чайцын. М.: Недра, 1971. 165 с.
3. **Меркулов, А. П.** Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. Самара: Оптима, 1997. 292 с.
4. **Патент на изобретение РФ №2237918.** Регулятор давления газа с положительной обратной связью (варианты) / Институт технологии и организации производства. Дата приоритета: 19.05.2003.
5. **Русак, А. М.** 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 // Сборник научных трудов IV Международного совещания по проблемам энергоаккумуляции и экологии в машиностроении, энергетике и на транспорте. М.: ИМАШ РАН, 2004. С. 133-144.
6. **Русак, А. М.** Разработка изотермического регулятора давления для редуцирования магистрального газа без подогрева на ГРС / А.М. Русак, В.Л. Юрьев, Ю.М. Ахметов, А.Ф. Набиуллин, В.А. Ломоносов, Р.Р. Усманов, Р.Ю. Дистанов // Наука – производству. 45 лет на пути технического прогресса: ежегодный научно-технический сборник / под общ. ред. В. Л. Юрьева. Уфа, 2003.
7. **Русак, А. М.** Использование особенностей вихревых течений для получения квазиизотермического процесса дросселирования давления природного газа / А. М. Русак, В.Л. Юрьев, Ю.М. Ахметов, В.А. Целищев, П.М. Кармацкий, С.В. Гурин // Проблемы машиноведения и критических технологий в машиностроительном комплексе РБ: сборник научных трудов АН РБ. Уфа: Гилем, 2005. С. 37-49.