

**В. Н. Петров, С. Л. Малышев, В. Г. Соловьёв,
В. Ф. Сопин**

ФАКТОРЫ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ПОВЕРОЧНЫХ УСТАНОВОК ПРИБОРОВ УЧЁТА

Ключевые слова: воспроизведение расхода, когерентные структуры, отрывные течения, пульсирующие течения, поверочная установка.

В работе рассмотрены основные причины, вызывающие неравномерность и пульсации расхода потока в трубопроводах поверочных установок и узлах учёта газоперекачивающих компрессорных станций. Показано влияние отрывных течений на расходные характеристики потока в канале. Представлены результаты экспериментального исследования характеристик течения, создаваемого компрессорным оборудованием, воспроизводящим поток. Описан физический механизм явлений, как следствие случайного процесса, зависящего от многих факторов.

Key words: play consumption, coherent structures, separated flow, pulsating currents, calibration setting.

The paper discusses the main causes of irregularity and pulsation flow in pipelines verification installations and metering of gas pumping compressor stations. It shows the influence of separated flow at discharge characteristics of the flow in the channel. The results of experimental research of characteristics of currents generated by the compressor equipment, reproducing the stream. Describes the physical mechanism of the phenomena, as a result of a random process that depends on many factors.

Введение

Эксплуатация поверочных установок средств измерений расхода, узлов учёта газа на газоперекачивающих компрессорных станциях показала, что требуемый уровень их метрологических характеристик обеспечивается не всегда. Во многих случаях это обусловлено неравномерным подводом измеряемой среды к приборам учёта или к рабочему участку по испытаниям и поверке средств измерений, а также неравномерным ее распределением по отдельным элементам установки [1]. Многочисленными теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что в напорных трубопроводах при изотермических условиях течения характер распределения скоростей по сечению не зависит ни от площади сечения трубопровода установки, ни от скоростей течения, ни от физических свойств протекающей среды, а является функцией безразмерного комплекса этих параметров, которыми могут быть критерии подобия. Следовательно, результаты исследований, проведенных на одной установке, могут быть перенесены на другую с учетом критериев подобия. Однако, вводимые в эксплуатацию поверочные установки, спроектированные на одинаковую производительность и оснащенные аналогичными приборами и оборудованием, имеют разные метрологические характеристики. К основным причинам, вызывающим это явление, можно отнести конструктивные особенности каждой поверочной установки, которые способствуют возникновению отрыва потока от обтекаемых поверхностей элементов установки, а также внешних пульсаций потока, генерируемых оборудованием, создающим поток, так как они создают неравномерности и пульсации потока в каналах установок. Рассмотрим влияние этих факторов на эксплуатационные характеристики установок.

Отрывные течения представляют собой довольно сложный раздел механики жидкости и газа. Особенности таких течений являются значитель-

ные градиенты давления, искривления линий тока, высокий уровень турбулентных пульсаций скорости. Благодаря этим свойствам в отрывных течениях происходит попеременное изменение направления вектора скорости на противоположное. Надо заметить, что влияние отрывных течений на характеристики потока в установках в настоящее время изучены недостаточно.

Кроме этого, в потоке могут образовываться когерентные структуры – крупномасштабные периодические вихревые образования, возникающие вследствие неустойчивости слоев смешения, развивающихся и взаимодействующих друг с другом на фоне мелкомасштабной турбулентности [2]. Эти структуры имеют размеры в продольном направлении течения, соизмеримые с поперечным сечением канала.

Отрыв потока возникает при его повороте, внезапном расширении, течениях в диффузоре при угле раскрытия более 14° , тройнике и т.д. В зависимости от конструктивных особенностей элементов установки возможно возникновение одной или нескольких областей с отрывом и присоединением потока. Положение точек отрыва и присоединения, как правило, заранее неизвестно. В качестве точки отрыва и присоединения потока к поверхности принимают координату, где осредненная величина напряжения трения на стенке обращается в ноль.

В криволинейном канале, наиболее часто встречающемся в поверочных установках, происходит следующий физический процесс. При любом повороте потока возникают центробежные силы, которые повышают статическое давление потока в направлении от центра кривизны, что приводит к соответствующему понижению скорости. По направлению к центру кривизны статическое давление падает, следовательно, скорость возрастает, что приводит к отрыву потока от стенок канала. При угле поворота колена $\alpha = 90^\circ$ и малом радиусе закругления максимальная ширина вихревой зоны достигает половины поперечного сечения, а длина

составляет $(3 \div 4) D$ (диаметр канала). Скругление кромок поворота колена значительно смягчает отрыв потока и, следовательно, улучшает распределение скоростей. Чем больше радиус закругления, тем меньше неравномерность потока и, следовательно, короче участок выравнивания скорости за поворотом.

Экспериментальные исследования, проведенные за последние годы [3], показывают, что течение в области отрыва и присоединения даже в условиях стационарного внешнего потока является неустойчивым и характеризуется интенсивными низкочастотными колебаниями, или пульсациями скорости потока.

В работах [4,5] представлен обзор результатов исследований пульсирующих потоков, выполненные в зарубежных научных центрах, где обозначены основные проблемы, требующие решения. Эти проблемы подробно рассмотрены в работе [3], к ним можно отнести:

- оценка длины прямого участка, необходимого для формирования полностью развитого турбулентного пульсирующего течения; исследование влияния на этот параметр числа Рейнольдса, амплитуды и частоты вынужденных пульсаций;

- систематическое изучение изменений усредненного по фазе профиля основной компоненты скорости в зависимости от числа Рейнольдса, амплитуды и частоты вынужденных пульсаций, получение информации о структуре генерации турбулентности нестационарных турбулентных течений;

- детальное изучение механизма генерации турбулентности в пульсирующих потоках в трубе, в том числе, определения характерной частоты турбулентных всплесков и влияний вынужденных пульсаций на структуру течения при известной частоте турбулентных всплесков;

- изучение процесса распространения турбулентности от стенки в направлении оси трубы;

- оценка влияния частоты и амплитуды наложенных пульсаций на осреднение по времени характеристики потока, в том числе, на потери трения в широком диапазоне изменения параметров течения и наложенной нестационарности.

О характере и степени нестационарности течения в отрывных зонах можно судить по результатам, представленным в работе [6]. Работа посвящена исследованию влиянию турбулентности внешнего потока на характеристики отрывных течений. В ней приводятся результаты исследований различных случаев отрыва потока. В экспериментах измерялись поля осреднённой и пульсационной составляющих скорости, трение и его пульсации на стенке. Особое внимание уделено измерению и анализу таких характеристик, как коэффициент вероятности обратного течения и частота реверсирования потока. Показано, что в отрывных зонах наблюдается интенсивные низкочастотные реверсивные пульсации скорости и трения на стенке, и что турбулизация внешнего потока приводит к сокращению длин зон отрыва.

В работах [3,7] представлены результаты экспериментального исследования гидродинамики и

теплообмена турбулентного отрывного течения в условиях периодических пульсаций потока. Выявлена существенная перестройка пространственно-временной структуры отрывного течения под действием наложенной нестационарности. Обнаружены явления сокращения продольных размеров отрывной области и существенной интенсификации теплообмена в отрывной области пульсирующего потока. Показано, что в процессе переноса в пульсирующем течении, особенно при отрыве потока, важную роль играют когерентные вихревые структуры, а на механизм их формирования основное влияние оказывает переменная составляющая инерционных сил в потоке. Авторы делают вывод, что пульсирующие течения, в том числе отрывные, могут удовлетворительно моделироваться с использованием осредненных по Рейнольдсу уравнений в двухметровой постановке (для простых конфигураций канала). Ввиду высокой чувствительности волновой структуры потока в канале к условиям на границе необходимо четко моделировать граничные условия.

Надо заметить, что существующие на сегодняшний день экспериментальные исследования пульсирующего течения получены путем моделирования структуры течения на специально созданных экспериментальных установках. В литературе отсутствует анализ взаимодействия внешних пульсаций потока с собственными акустическими свойствами канала - это в первую очередь относится к течениям с периодической нестационарностью, обусловленной функциональными особенностями оборудования, создающего поток. Такие исследования необходимы для проектирования эталонных и поверочных установок [8,9], а также газоперекачивающих компрессорных станций.

В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований характеристик воздушного потока в измерительном участке напорной поверочной установки, создаваемого двумя винтовыми компрессорами, Allegro 38 фирмы «ALUP» номинальной производительностью 250 м³/ч, приведенных к стандартным условиям, и Atlas Copco G250 производительностью 2300 м³/ч, приведённых к стандартным условиям. У винтового компрессора Allegro 38 последовательно в линии подачи воздуха установлены три ресивера емкостью 0,5 м³ каждый. Максимальное давление в системе, создаваемое каждым из компрессоров, составляло 1,0 МПа. Расход воздуха в диапазоне от 0,1 до 250 ст.м³/ч измерялся набором эталонных критических сопел типа МСК №№ 1Н ÷ 11Н, характеристики которых представлены в таблице 1, а также ротационными счетчиками газа модели RVG – G65 фирмы «Elster» DN 50 с диапазоном измерений расхода от 5 до 100 м³/ч и RVG – G160 DN 80 с диапазоном измерений расхода от 13 до 250 м³/ч (в рабочих условиях). В экспериментальных исследованиях использовались датчики избыточного давления Метран – 55 DU модели 515 с диапазоном измерений давления от 0,25 до 2,5 МПа; термопреобразователь сопротивления ТСР Метран – 206-04-100-В-4-1-Н10-У1.1 с диапазоном измерений температуры от 50 до

200 С⁰. Блок сопел 1Н ÷ 11Н подключен последовательно с RVG и предназначен, как было сказано выше, для задания необходимого расхода газа.

Таблица 1 - Характеристики сопел

№ сопла	1Н	2Н	3Н	4Н	5Н	6Н
Расход воздуха, м ³ /ч	0,032	0,052	0,1	0,32	0,83	2,0
№ сопла	7Н	8Н	9Н	10Н	11Н	
Расход воздуха, м ³ /ч	5,2	12,7	35	93	248	

Экспериментальная часть

Экспериментальные исследования выполнялись при установившемся расходе воздуха через рабочий участок. При подаче воздуха от компрессора Allegro 38 диапазон расхода достигал максимального значения $Q_{\max} = 250 \text{ м}^3/\text{ч}$, приведённого к стандартным условиям. При этом среднерасходные скорости потока в рабочем участке составляли $V = 5 \div 10 \text{ м/с}$, а соответствующие числа Рейнольдса изменялись в диапазоне $Re = 0,3 \div 1,8 \times 10^4$ в рабочих условиях в исследуемом участке. Воздушный поток, подаваемый от компрессора Atlas Copco G250, имел соответственно следующие параметры: $Q_{\max} = 2300 \text{ м}^3/\text{ч}$, приведённые к стандартным условиям, а числа Рейнольдса изменялись в диапазоне $Re = 0,3 \div 3,8 \times 10^4$ в рабочих условиях потока.

Обсуждение результатов

С целью определения характеристик потока, образующихся после компрессорных установок, была проведена серия экспериментальных исследований. На рис.1 и 2 представлены результаты измерений расхода и избыточного давления продолжительностью более 300 с, характеризующие воспроизведение расхода как случайного процесса, который может быть представлен в виде суммы двух составляющих:

- низкочастотных периодических колебаний, обусловленных колебаниями гидростатического напора (синусоидальный характер кривой);
- турбулентного пульсационного процесса (синусоида имеет пульсационный характер).

Надо заметить, что вопросами выравнивания потока в поперечном сечении различных по форме каналах исследовательских установок занимаются давно. Известно, что для выравнивания потока при незначительной неравномерности по его сечению применяются сетки или решетки. Путем подбора соответствующей степени затенения сеток добиваются необходимой степени равномерности распределения скоростей по сечению канала. Под затенением подразумевается отношение площади непроницаемой поверхности сетки к площади её проходного сечения. Эти методы подробно описаны в работе [10]. Однако они относятся к выравниванию профиля осреднённой скорости по сечению канала, а с целью стабилизации воспроизведения расхода необходимо выравнивать: низкочастотные колебания и турбулентные пульсации.

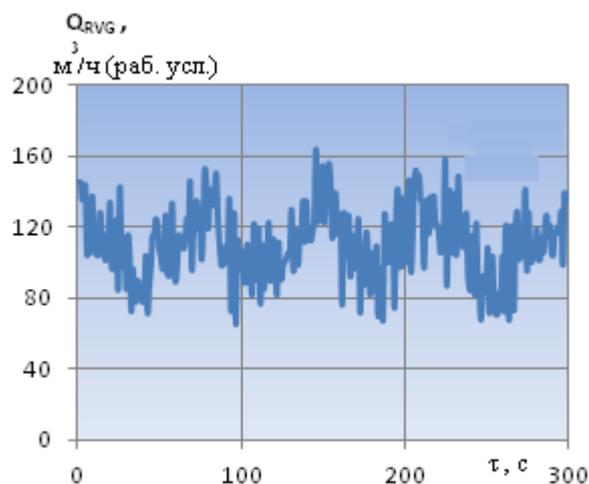


Рис. 1 - Пульсации и флуктуации расхода, измененные RVG G160 при работе Atlas Copco G250

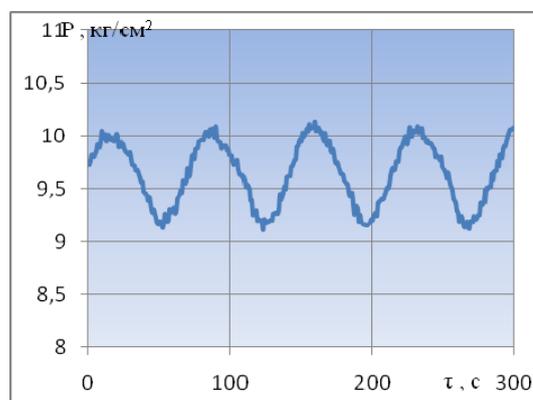


Рис. 2 - Пульсации и флуктуации давления жидкости после КС при работе с Atlas Copco G250

Результаты экспериментального исследования структуры течения за блоком сопел и ротационным счётчиком (рис.3 и 4) показывают, что блок критических сопел полностью ликвидирует турбулентные пульсации потока и характеризуется более стабильным воспроизведением расхода.

Необходимо отметить, что использовавшиеся в исследовательских целях модели винтовых воздушных компрессоров, «Atlas Copco G250» и «Allegro 38», имеют системы не плавного и ступенчатого регулирования производительности, а дискретное регулирование - то есть, они или производят сжатый воздух в объеме 100% от своей номинальной производительности, или не производят его вообще. У современных винтовых компрессоров, помимо пуска/остановки электродвигателя, предусмотрен более щадящий способ изменения режима работы - холостой ход. Регулирующий элемент - сервомотор настроен на определённый интервал давления нагрузки и разгрузки, в пределах которого происходит сжатие воздуха, что подробно описано в инструкции по эксплуатации компрессора [11]. Таким образом, при воспроизведении расхода воздуха в магистрале получаем картину, когда расход газа периодически возрастает и уменьшается, этим можно объяснить низкочастотные периодические колебания воздушного потока.

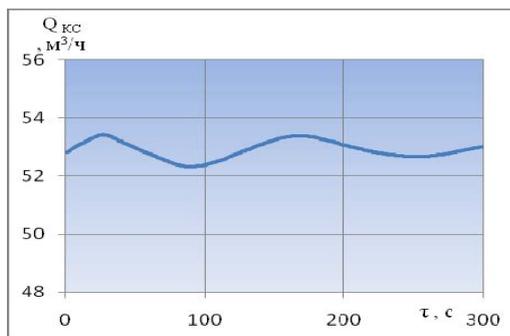


Рис. 3 - Диаграмма измерений объёмного расхода через КС

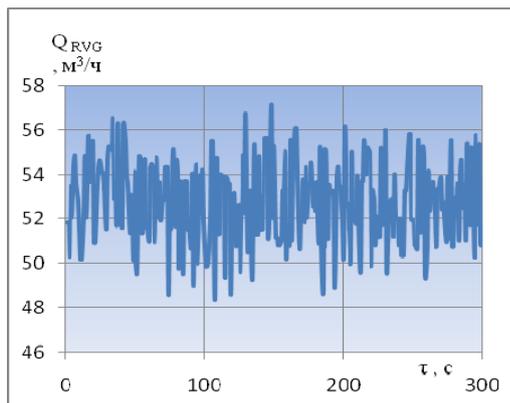


Рис. 4 - Диаграмма измерений объёмного расхода через ротационный счётчик RVG G65

Период низкочастотных колебаний, как следует из сравнения рис.1 и 2 с рис.3 и 4 уменьшается при проведении исследований от воздушного компрессора «Allegro 38» в линии подачи воздуха которого, как было сказано выше, последовательно установлено три ресивера ёмкостью 0,5 м³ каждый. Следовательно, в целях получения технических характеристик поверочных установок в требуемых пределах, в их состав целесообразно устанавливать узел стабилизации потока - ресивер.

Заключение

Предложенные в статье меры позволят уменьшить влияние таких факторов, как низкочастотные периодические колебания и турбулентные пульсации потока в поверочных установках. Значительно сложнее решить вопрос учёта факторов, влияющих на точность измерений массового и объёмного расхода и количества газа. Надо заметить, что давление газа после компрессоров газоперека-

чивающих станций в магистрали составляет 15...20МПа. При этом основными факторами, влияющими на точность измерений расхода и количества газа, могут быть конструктивные особенности компрессорной станции и физические свойства среды, находящейся под таким давлением. Для оценки влияния этих факторов необходимо проведение дополнительных экспериментальных исследований на режимах и с использованием среды с параметрами, близкими к существующим на газоперекачивающих компрессорных станциях.

Литература

- Идельчик И.Е. Аэродинамика технологических аппаратов.-М.: Машиностроение 1983.-351с.
- Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 240 с. – ISBN 5-9221-0161-7.;
- Михеев Н.И., Молочников В.М., Давлетшин И.А. и др. Гидродинамические и тепловые процессы в пульсирующем течении. VI Школа – семинар по проблемам теплообмена и гидродинамики в энергомашиностроении. - Казань - 2008, с. 48-76;
- Gündogdu M.Y., Carpinlioglu M.O. Present State of Art on Pulsatile Flow Theory (Part 1: Laminar and Thansitional Flow regimes) Jap. Soc. Mech. Eng. – В. 1999. Vol. 42- No. 3. P. 384-397;
- Gündogdu M.Y., Carpinlioglu M.O. Present State of Art on Pulsatile Flow Theory (Part 2: Laminar and Thansitional Flow regimes) Jap. Soc. Mech. Eng. – В. 1999. Vol. 42- No. 3. P. 398-410;
- Алемасов В.Е., Глебов Г.А., Козлов А.П. Термоанемометрические методы исследования отрывных течений. – Казань: Казанский филиал АН СССР, 1989-178 с.;
- Душин Н.С. и др. Структура отрыва потока в нестационарных условиях. VI Школа семинар по проблемам теплообмена и гидродинамики и энергомашиностроении. Казань, 2008, с186-189;
- Ягудин И.Р., Петров В.Н., Дресвянников А.Ф. Перспективное направление разработки мобильных поверочных установок по измерению сырой нефти. Вестник Казан. технол. ун-та – Казань-2013, т. 16, №4, , с. 203-208;
- Ившин В.П., Перухин М.Ю. Расчет расхода газожидкостной смеси в горизонтальном трубопроводе. Вестник Казан. технол. ун-та. Т14, № 18, 2011, с 164-168;
- Идельчик И.Е. Некоторые эффекты и парадоксы в аэродинамике и гидравлике.-М.: Машиностроение 1982.-96с.;
- Atlas Copco GQ 250. APF 172110. Instruction book. 2012-05. 92p. www.atlascopco.com

© **В. Н. Петров** – к.т.н., доц. каф. экономики и управления на предприятии КНИТУ-КАИ им.А.Н.Туполева; **С. Л. Малышев** - научный сотрудник отдела Метрологического обеспечения средств и систем измерений расхода и количества сырой нефти и газожидкостных потоков (НИО-9) ФГУП «ВНИИР», г. Казань; **В. Г. Соловьёв** – директор ФГУП «ВНИИР»; **В. Ф. Сопин** - д.х.н., проф., зав. каф. аналитической химии, сертификации и менеджмента качества КНИТУ, sopin@kstu.ru.