

СОВРЕМЕННОЕ РАЗВИТИЕ ТРЕХПОТОЧНОЙ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ

А. О. СЕННИКОВ¹, Р. Р. КАЛИМУЛЛИН², П. В. ПЕТРОВ³

¹ sennikov12@yandex.ru, ² radik_kalimullin@bk.ru, ³ pgl.petrov@mail.ru

¹ ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Аннотация. В данной статье рассматриваются практические аспекты эксплуатации трехпоточных вихревых труб в цикле низкотемпературной сепарации попутного нефтяного газа непосредственно перед его подачей в магистральные трубопроводы. Выделены основные виды вихревых установок, их преимущества и недостатки. Проведен анализ добычи попутного нефтяного газа, доля его сжигания на факелах. Сделан вывод о том, что их использование позволяет относительно рентабельно тушить промышленные факела, улучшая тем самым экологическую обстановку при разработке нефтяных месторождений.

Ключевые слова: попутный нефтяной газ; сепарационная установка; фильтр-адсорбер; факельное оборудование; рекуперация паров; трехпоточная вихревая труба.

ВВЕДЕНИЕ

Попутный нефтяной газ (ПНГ), дегазируемый из нефти при ее подготовке к транспорту, в России в основном сжигается на факелах. Сохранение такой ситуации — это не только продолжающиеся потери углеводородного сырья, но и нанесение значительного экологического вреда окружающей среде, вплоть до возможного изменения климата планеты. Каждый год, по современным оценкам, в Российской Федерации добывается около 70 млрд кубометров ПНГ, из которых не менее 25 % сжигается. Государство борется с таким варварским отношением к природе и вторичным сырьевым ресурсам. Накладываются соответствующие штрафные санкции на предприятия, сжигающие ПНГ, предоставляются определенные льготы предприятиям, утилизирующим попутный нефтяной газ. Однако установленные государством экологические нормы удовлетворительно выполняются только отдельными нефтедобывающими компаниями, остальные идут на уплату штрафов. Такое состояние дел вызвано комплексом причин, где далеко не последнее место занимают трудности, связанные с техническими моментами. При этом определенную негативную роль играют причины, которые приводят к значительным капитальным и энергетическим затратам при утилизации ПНГ. На сегодняшний день имеются пути полезного использования ПНГ как альтернативы экологически неприемлемому факелу. Это, прежде всего, подача ПНГ в магистральные трубопроводы в качестве энергоносителя и сырья для химической промышленности, поставка его на газоперерабатывающие заводы и для местных нужд, использование в качестве топлива в газопоршневых и газотурбинных электростанциях, закачивание в пласты и резервуары. Возможны также более высокотехнологичные методы переработки ПНГ - это получение сжиженного газа, выделение отдельных углеводородных фракций, производство метанола, синтетического жидкого топлива и другой товарной продукции. Практически все перечисленные методы требуют предварительной промышленной подготовки ПНГ для транспорта, т.е. доведения его до регламентируемых показателей по температуре точки росы ключевых компонентов (воды и углеводородов). В России наибольшее распространение получили низкотемпературные методы конденсации примесей, где в качестве генераторов холода применяются различные расширительные газодинамические аппараты, простейшим, но и наименее эффективным из которых является дроссель, работающий

на эффекте Джоуля—Томсона. Следует отметить, что для обеспечения давления транспортирования ПНГ, а также необходимого перепада давления на расширителе применяется, как правило, стадия энергозатратного компремирования. В этом случае далеко не всегда возможности дросселя могут обеспечить требуемую точку росы подготавливаемого газа даже при использовании термодинамически совершенной технологической схемы процесса низкотемпературной сепарации (НТС). Лидерами по температурной эффективности и соответственно холодопроизводительности принадлежит турбодетандерам. Однако эти аппараты весьма сложны конструктивно и требуют значительных эксплуатационных затрат, что снижает их рентабельность, особенно при освоении малых месторождений. В то же время имеется ряд расширительных аппаратов, занимающих промежуточное между дросселем и турбодетандером положение по температурной эффективности. К ним можно отнести волновые детандеры, пульсационные и акустические охладители газа, вихревые трубы (ВТ), реализующие эффект Ранка—Хилша. В особую группу можно выделить аппараты, сепарирующий эффект которых основан на низкой статической температуре скоростного потока газа. Это так называемые газодинамические осушители, 3S-сепараторы и трубы Леонтьева. Из всех перечисленных (относительно новых) устройств к настоящему моменту лишь вихревая технология заняла заметное место в нефтегазовой промышленности и успешно реализована на нескольких российских месторождениях [1]. При этом, если на начало реализации ВТ (1998 г.) производительность вихревых установок (ВУ) составляла не более 3000 нм³ / час [2], то в 2018—2019 гг. была введена в строй ВУ производительностью до 320 000 нм³ / час [3]. Период внедрения вихревой технологии в отечественную промышленность характеризовался не только ростом производительности единичных ВТ и ВУ в целом, но и отработкой конструкции вихревых труб, увеличением их холодопроизводительности, а также совершенствованием схем НТС с максимально возможной рекуперацией холода технологических потоков.[5]

СПОСОБЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВ

Решить проблему высокой стоимости и большого энергопотребления процесса фракционирования ПНГ можно, используя газодинамический способ разделения газов. Данный способ разделения основан на придании потоку газа скоростей близких к звуковым и сверхзвуковым за счет перепада давления и особого строения проточной части аппараты для создания статической температуры, которая ниже температуры газа на входе в аппарат. Газодинамические аппараты отличаются простотой исполнения, отсутствием движущихся частей и как следствие высокой надежностью, компактностью, возможностью одновременно проводить процессы охлаждения и сепарации газа. Кроме того, газодинамические аппараты работе обладают большей эффективностью по сравнению с традиционными процессами низкотемпературной конденсации и сепарации, основанными на эффекте Джоуля-Томпсона. В нашей стране в настоящее время наибольшее распространение получили такие газодинамические аппараты как 3-S сепаратор (SuperSonicSeparator) и вихревые трубы я Ранка-Хилша. На рис. 1 представлена принципиальная схема 3-S сепаратора, работа которого основана на закрутке потока газа неподвижными лопатками 1, охлаждении в сверхзвуковом сопле 2, формировании и удалении за счет центробежных сил дисперсной фазы в рабочей камере 3. Часть потока, содержащая дисперсную фазу, отводится через выходной раструб 4. Оставшаяся часть газа отводится через диффузор 5.

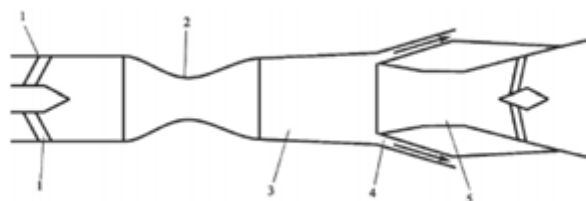


Рис. 1. Принципиальная схема 3-S сепаратора:

1 – Неподвижные лопатки; 2 – сверхзвуковое сопло; 3 – рабочая камера; 4 – раструб; 5 – диффузор

3-S сепараторы отличаются высокой производительностью, успешной эксплуатацией на месторождениях, меньшим перепадом давления по сравнению с дросселями и вихревыми трубами. Приводятся основные недостатки сверхзвуковых сепараторов – зависимость от диапазона стабильной работы от количества конденсирующихся компонентов в газе, необходимость внесения в поток газа ядер конденсации, высокая стоимость изготовления сверхзвукового участка аппарата, необходимость дополнительной сепарации конденсируемых компонентов. Альтернативой сверхзвуковым сепараторам, не уступающим им по эффективности, могут стать вихревые трубы (ВТ) Ранка-Хилша. Работа ВТ основана на эффекте Ранка-Хилша – энергетическом разделении сжатого закрученного потока газа на охлажденный и подогретый потоки (рис. 2). ВТ отличаются простотой конструкции, стабильностью работы, высокой производительностью при низком значении перепада давления, отсутствием движущихся частей, возможностью получать как подогретый, так и охлажденный потоки газа. Впервые, эффект энергетического разделения закрученных потоков описал французский инженер Жозеф Ранк в 20-е годы прошлого столетия. Позже немецким ученым Хилшем были проведены исследования по определению эффективности ВТ. В последующие годы были проведены исследования по установлению причины возникновения температурного разделения, определения оптимальных геометрических параметров ВТ, влияния начальных давления, температуры и влажности газа.



Рис. 2. Схема работы вихревой трубы Ранка-Хильша

Наибольшее распространение получила теория о существовании интенсивных турбулентных пульсаций в радиальном направлении. Согласно этой теории, возникают «внешний» и «внутренний» вихри, которые адиабатически расширяются и сжимаются при перемещении в области высоких скоростей вращающегося газа, совершая при этом холодильные циклы. Другое объяснение базируется на допущении, что громкий свист при работе ВТ ускоряет периферийные слои вихревого течения, тем самым обеспечивая энергетическое разделение газа. Следующая теория объясняет эффект температурной стратификации газа за счет волнового расширения и сжатия газов. В качестве причины возникновения эффекта Ранка-Хилша приводится центробежная сепарация турбулентных элементов по величине тангенциальной скорости. ВТ получили широкое распространение в промышленности. Трубы Ранка-Хилша используют для вентиляции помещений и салонов летательных аппаратов, в процессах охлаждения микросхем, в пищевой промышленности, в установках термостатирования, в процессах очистки газов и т.д.

КЛАССИФИКАЦИЯ ВИХРЕВЫХ ТРУБ

По способу вывода выходящих потоков исследователи обычно выделяют прямоточные, двухконтурные, противоточные, одnorасходные, трехпоточные вихревые трубы. В прямоточных ВТ горячий и холодный потоки отводятся с удаленного от входного сопла конца, противоположный конец устройства заглушен. Подогретый газ отводится с периферийных слоев, а охлажденный газ – с приосевой области. Для данного типа труб разность температур на холодном и горячем потоках отличается на 140-230 °С. В одnorасходных ВТ газ отводится от близкого к входному соплу конца, в то время как противоположный конец устройства заглушен. Из диафрагмы такого устройства отводится охлажденный поток газа. Одnorасходные ВТ нашли широкое применение в аэрокосмической и энергетической отраслях. В двухконтурных ВТ вводится дополнительный поток газа в приосевую зону камеры энергоразделения со

стороны дросселя. Данное решение повышает изоэнтропный КПД. В противоточных ВТ охлажденный и подогретый потоки отводятся с противоположенных концов камеры энергоразделения. Данный вид ВТ получил наибольшее распространение в промышленности в силу большей изученности. Трехпоточные ВТ представляют собой противоточную ВТ с устройством отвода конденсата. Трехпоточные трубы используются в процессах очистки газов.

По способу закрутки потока сжатого газа наибольшее распространение получили ВТ с тангенциальным закручивающим устройством (ТЗУ) и винтовым закручивающим устройством (ВЗУ). Для каждого типа закручивающего устройства следует подбирать оптимальные значения площади сопла, количества сопел, формы сопла, соотношения сторон сопла, длины участка закрутки (для ВЗУ) и угла ввода газа. По форме камеры энергоразделения вихревые трубы подразделяются на цилиндрические, конические и с искривленной камерой энергоразделения.

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ВИХРЕВЫХ ТРУБ

Как отмечалось выше, изменение конструкции некоторых элементов вихревой трубы способствует увеличению ее тепло- и холодопроизводительности, а также оптимизации размеров. Так изготовление узла ввода с улиткой и диафрагмой одной деталью позволяет увеличить термодинамическую эффективность ВТ, а также предупредить проворачивание закручивающей улитки в корпусе аппарата, снизить потери давления на входе и шум при работе трубы. В описан сопловой ввод газа, содержащий лопатки каплевидной формы, которые позволяют минимизировать гидравлические потери энергии газа в процессе формирования до- и сверхзвукового течения. Кроме того, данная конструкция позволяет перемещать лопатки относительно крепежного штифта, тем самым регулируя площадь соплового ввода (рис. 3). Цегельский В.Г. и Жидков М.А. предложили следующую конструкцию закручивающего устройства – на входе в улиткообразную камеру установлено сверхзвуковое сопло. Улиткообразная поверхность камеры завихрения образована проницаемой стенкой, и с наружной стороны этой стенки выполнена полость для отвода конденсата из газового потока. [5] Данное решение способствует большему преобразованию кинетической энергии в тепловую при одновременной осушке потока газообразной среды. Проницаемая стенка может быть выполнена в виде перфорированной поверхности, пористой поверхности или в виде сетки, причем сетка может быть однослойная и многослойная в зависимости от природы конденсата (рис. 4).

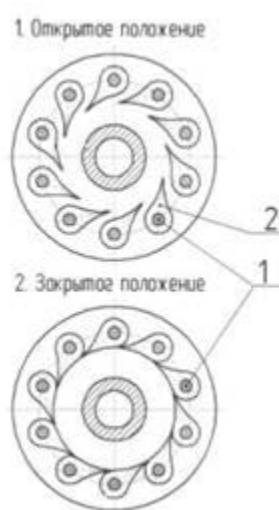


Рис. 3. Закручивающее устройство с каплевидными лопатками:
1 – крепежный штифт; 2 – каплевидная лопатка



Рис. 4. Закручивающее устройство с сепарацией конденсата:

1 – закручивающая камера; 2 – сверхзвуковое сопло; 3 – отверстие для отвода холодного газа;
4 – проницаемая стенка; 5 – полость для кожуха

Жидковым М.А. и другими описано устройство соплового ввода с регулицией площади поперечного сечения. Основным элементом узла регулирования расхода газа через ВТ – подвижный клин, который приводится в движение мембранным исполнительным механизмом (рис.5). Применение ВТ с регулируемой площадью соплового ввода способствует повышению стабильности их работы при различных давлениях входящего газа и, как следствие, большему распространению в технике.

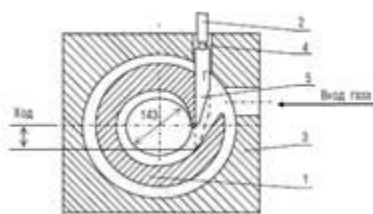


Рис. 5. Схема соплового ввода с регулицией площади поперечного сечения:

1 – завихритель; 2 – шток; 3 – конус; 4 – шарнир; 5 – клиновидная задвижка

Еще один способ повышения холодопроизводительности ВТ заключается в охлаждении камеры энергоразделения холодной водой. Данное решение позволяет повысить холодопроизводительность на 9%. В предложен новый тип ВТ – кольцевая вихревая труба (annularvortextube). В данной конструкции поток горячего воздуха после конического вентиля (отражающего устройства) направляется вдоль наружной стороны горячего конца вихревой трубы. Это приводит к возрастанию потерь тепла через камеру энергоразделения, что в свою очередь увеличивает холодопроизводительность примерно на 24%, по сравнению с обычной вихревой трубой Ранка-Хилша.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показана зависимость производительности ВТ от ее конструкции. Анализ литературных данных показал значительное влияние исполнения закручивающего устройства на работу ВТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахметов Р.Ф. Анализ способов переработки попутного нефтяного газа / Ахметов Р.Ф., Сидоров Г.М., Рахимов М.Н., Шириязданов Р.Р., Давлетшин А.Р., Теляшев Э.Г., Каримова А.Р. // Наука и техника в газовой промышленности. –2015. – №1(61). – С. 38-44.
2. Гудков, С.Ф. Переработка углеводородных попутных и природных газов / С.Ф. Гудков. –Москва: Гостоптехиздат, 1960.- 176 с.
3. Агапов Р.В. 6 МВТ на попутном нефтяном газе / Агапов Р.В., Калинин А.Н. // Турбины и дизели. – 2008. - №5. – С.36-41
4. Ахметов Ю. М., Соловьев А. А., Тарасов А. А., Целищев А. В. / Численное моделирование течения газожидкостного потока в вихревой трубе // Вестник УГАТУ 2010. Т. 14, № 1 (36). С. 32–39
5. Газодинамическая очистка попутного нефтяного газа – путь к улучшению экологии планеты. /В.А. Девисилов, Д.А. Жидков.– 2014.–№1(6).–1723.

ОБ АВТОРАХ

СЕННИКОВ Александр Олегович, магистрант кафедры ПГМ. Дипл. бакалавра специальности Энергетическое машиностроение (УГАТУ, 2019).

КАЛИМУЛЛИН Радик Рифкатович, доц. каф. ПГМ УГАТУ, к- т техн. наук.

ПЕТРОВ Павел Валерьевич, доц. каф. ПГМ УГАТУ, к- т техн. наук.

METADATA

Title: Modern development of three-thread vortex tube.

Authors: A. O. Sennikov ¹, R. R. Kalimullin ², P. V. Petrov ³

Affiliation:

¹ Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ¹sennikov12@yandex.ru, ²radik_kalimullin@bk.ru, ³pgl.petrov@mail.ru

Language: Russian.

Source: Molodezhnyj Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), no. 2 (25), pp. 82-87, 2021. ISSN 2225-9309 (Print).

Abstract: This article discusses the practical aspects of the operation of three-stream vortex tubes in a cycle of low-temperature separation of associated petroleum gas immediately before its supply to the main pipelines. The main types of vortex installations, their advantages and disadvantages are highlighted. The analysis of associated petroleum gas production, the share of its flaring. It is concluded that their use makes it possible to extinguish fishing flames relatively cost-effectively, thereby improving the environmental situation in the development of oil fields.

Key words: associated petroleum gas, separation unit, filter adsorber, flare equipment, vapor recovery, three-flow vortex tube.

SENNIKOV, Alexander Olegovich, postgraduate student of the Department of PGM. Dipl. Bachelor's degree in Power Engineering (USATU, 2019).

KALIMULLIN, Radik Rifkatovich, Assoc. prof., Dept. of PGM USATU. Cand. Tech. Sci.

PETROV, Pavel Valerievich, Assoc. prof., Dept. of PGM USATU. Cand. Tech. Sci.