

УДК 532.516.5

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА – ПУТЬ К УЛУЧШЕНИЮ ЭКОЛОГИИ ПЛАНЕТЫ

© 2014 В.А. Девисилов, Д.А. Жидков

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

Поступила в редакцию 13.01.2014

В работе рассматриваются теоретические и практические аспекты газодинамического метода очистки попутного нефтяного газа (с акцентом на вихревые трубы Ранка-Хилша), позволяющего успешно тушить сбросные факела. Тем самым решаются не только экологические, но и экономические вопросы сокращения потерь энергоносителей в России.

Ключевые слова: двухпоточная вихревая труба, трехпоточная вихревая труба, вихревая установка, холодопроизводительность, 3S-сепарация, природный газ, попутный нефтяной газ, конденсат, технологическая схема, температура, давление, расход.

1. ВВЕДЕНИЕ

Каждый год в России добывается не менее 70 млрд. кубометров попутного нефтяного газа (ПНГ), из которых не менее 25 % сжигается в факелях, что крайне отрицательно сказывается на экологической обстановке и приводит нерациональному использованию не возобновляемых природных ресурсов.

Это вызвано комплексом причин, где далеко не последнее место занимают трудности, связанные с техническими аспектами улавливания и дальнейшего использования ПНГ. Одной из основных причин является необходимость значительных капитальных и энергетических затрат при утилизации ПНГ.

2. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ МЕТОД РАЗДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Газодинамический метод разделения газовых смесей теоретически осмысливается и экспериментально изучается как в России, так и за рубежом, начиная с конца 60-х – начала 70-х годов прошлого столетия [1,2]. Он основан на придании газовому потоку высокой скорости (вплоть до сверхзвуковой) для создания скоростной (статической) температуры (T_{ct}), которая заведомо ниже температуры торможения на входе в струйный аппарат (T_b). На такой предпосылке основаны конструкции газодинамических осушителей, вихревых сепараторов, 3S-сепараторов и вихревых труб (ВТ). Низкая статическая температура в этих устройствах способствует интенсивной конденсации примесей из газовых смесей

для последующей сепарацией жидкой фазы и получения кондиционного продукта.

Статическая температура, как показатель перехода потенциальной энергии давления газа в кинетическую энергию движущегося потока, определяется соотношением:

$$T_{cm} = T_e - \frac{v^2}{2 \cdot C_p}. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что статическая температура тем ниже, чем выше скорость истечения газа.

Расчет T_{ct} удобно вести с помощью основного критерия подобия для скоростных газовых течений – числа Маха M . По определению:

$$M = \frac{v}{a}, \quad (2)$$

здесь: $a = \sqrt{\kappa \cdot g \cdot R \cdot T}$ – скорость звука. (3)

При этом если $M < 1$, то течение газа дозвуковое, при $M = 1$ – звуковое (критическое) и при $M > 1$ – сверхзвуковое. Известны термодинамические зависимости, по которым можно рассчитать T_{ct} по известному значению числа Маха [3,4]. Так, для $M < 1$ статическая температура будет равна:

$$T_{cm} = T_e [1 - M^2 (\kappa_e - 1)(\kappa_e + 1)^{-1}]; \quad (4)$$

при $M = 1$

$$T_{cm} = T_e [2(\kappa_e + 1)^{-1}]; \quad (5)$$

при $M > 1$

$$T_{cm} = \frac{T_e [2(\kappa_e + 1)^{-1}] \cdot [1 + 0,5(\kappa_e - 1)]}{1 + 0,5(\kappa_e - 1) \cdot M^2}. \quad (6)$$

Девисилов Владимир Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: devisilov@bmstu.ru
Жидков Дмитрий Алексеевич, аспирант.
E-mail: grena_der@mail.ru

Из приведенных уравнений видно, что для оценки T_{ct} при $M = 1$ нужно знать только T_b и показатель адиабаты κ_e . При определении T_{ct} для дозвукового и сверхзвукового истечений необходимо также знать число Маха. Если параметр M известен, то можно рассчитать не только T_{ct} , но не менее важный параметр для процесса конденсации – статическое давление P_{ct} . Его легко вывести из ниже приведенного соотношения (7) [3]:

$$M^2 = 2(\kappa_e - 1)^{-1} \cdot [(P_e / P_{cm})^{(\kappa_e - 1)/\kappa_e} - 1]. \quad (7)$$

Произведя необходимые преобразования, получим:

$$P_{cm} = \sqrt[n]{\frac{2 \cdot (P_e)^n}{M^2 \cdot (\kappa_e - 1) + 2}}, \quad (8)$$

$$\text{где } n = \frac{(\kappa_e - 1)}{\kappa_e}.$$

В формуле (8) имеется одна независимая переменная – это число Маха. Отсюда следует, что при $M = 0$ (стационарное состояние газа) $P_{ct} = P_b$. Но как только появляется скорость, т.е. $M > 0$, то статическое давление становится ниже входного ($P_{ct} < P_b$). Таким образом, при разгоне газа в профилированном тракте газодинамического аппарата происходит одновременное снижение и статической температуры, и статического давления. Поэтому процесс конденсации компонентов в скоростной струе определяется совокупностью этих факторов. Но если понижение T_{ct} способствует механизму конденсации, то уменьшение P_{ct} уменьшает интенсивность этого процесса.

3. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В настоящее время наибольшее практическое применение в системах низкотемпературной сепарации (НТС) попутного нефтяного газа (ПНГ) нашли два типа аппаратов – это сверхзвуковые 3S-сепараторы (Super Sonic Separator) [5, 6] и вих-

ревые трубы различной модификации [7, 8, 9, 10]. Причем с полным основанием можно сказать, что в нефтегазовой промышленности России на сегодня превалируют вихревые трубы.

3S-сепаратор представляет собой горизонтально расположенный аппарат (рис. 1), в котором углеводородный газ закручивается с помощью устройства 1. Далее он проходит сверхзвуковое сопло 2 и рабочую камеру 3. Здесь образуется жидккая дисперсная фаза, которая за счет центробежных сил отбрасывается на внутреннюю стенку аппарата. Часть потока (15–30%), содержащая сжиженные компоненты, отбирается на периферию с помощью устройства 4. Очищенный газ проходит диффузор 5, где происходит частичное восстановление давления и направляется по назначению.

Достоинства 3S-сепаратора: возможность достижения глубокой степени очистки газа за счет низкой статической температуры; меньший перепад рабочего давления по сравнению с ВТ. Основные недостатки: стабильная работа только в определенном диапазоне концентрации конденсируемых компонентов, необходимость иметь на входе жидкую дисперсную фазу (ядра конденсации); требуется также оборудование для сепарации отбираемой газожидкостной смеси и технологические решения по возврату в схему газового “хвоста” после сепарации. Кроме того, эти аппараты имеют весьма высокую стоимость из-за необходимости тщательной обработки (полировка) сверхзвукового тракта.

По функциональным возможностям к 3S-сепаратору приближается трехпоточная вихревая труба (ТВТ) [7]. В ней потенциальная энергия давления газа целиком идет на закрутку потока в отличие от 3S-сепаратора, где эта энергия перераспределяется между закруткой и разгоном струи до сверхзвуковой скорости. В ТВТ создается более мощное поле центробежных сил по сравнению с 3S-сепаратором, но отсутствует возможность восстанавливать давление рабочего газа.

Принципиальная схема ТВТ приведена на рис. 2. Аппарат расположен вертикально и имеет один поток на входе и три на выходе: холодный (патрубок 7), горячий (патрубок 11) и вы-

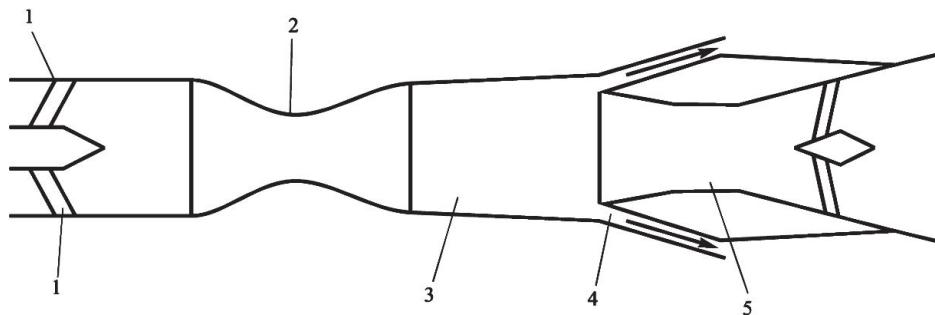


Рис. 1. Принципиальная схема 3S-сепаратора.

вод жидкой фракции (патрубок 12).

ТВТ имеет корпус 1 с тангенциальным сопловым вводом 3, вихревую камеру 5, диафрагму с центральным отверстием 4 для отбора газа холодного потока, сепарационный узел 9, кольцеобразный конденсатосборник 6 и устройство для регулирования производительности ТВТ, состоящее из подвижной клинообразной задвижки 2 и привода 8. Регулирующее устройство имеет большое значение для адаптации ТВТ к системе АСУ ТП. В 3S-сепараторах подобная опция отсутствует.

Достоинства регулируемых ТВТ по сравнению с 3S-сепаратором очевидны. Это отсутствие необходимости в дополнительном сепарационном оборудовании и в дозировании дисперсной жидкости на вход в аппарат. Однако самое главное преимущество ТВТ заключается в бóльшей холодопроизводительности по сравнению с 3S-сепаратором. И немаловажный момент – цена аппарата. Стоимость ТВТ при условии одинаковой производительности по газу существенно ниже (в разы) по сравнению с 3S-сепаратором.

4. ПРОМЫШЛЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

К сожалению, в публикациях практически отсутствуют реальные режимы работы промышленных 3S-сепараторов, поэтому нет возможности объективно сопоставить их сепарационную эффективность с эффективностью работы ТВТ. Весьма скучные экспериментальные данные, имеющиеся в [6], не показательны. Здесь сравниваются режимы эксплуатации дроссельной установки НТС при работе только на дросселе и с параллельно подключенным 3S-блоком (в блок входит дополнительный рекуперативный теплообменник). Данный блок позволяет при перепаде давлений с 12 до 7 МПа

($\pi_{3S} = \frac{P_{ex}}{P_{вых}} = 1,70$) получить температуру

точки росы по углеводородам на выходе из 3S-

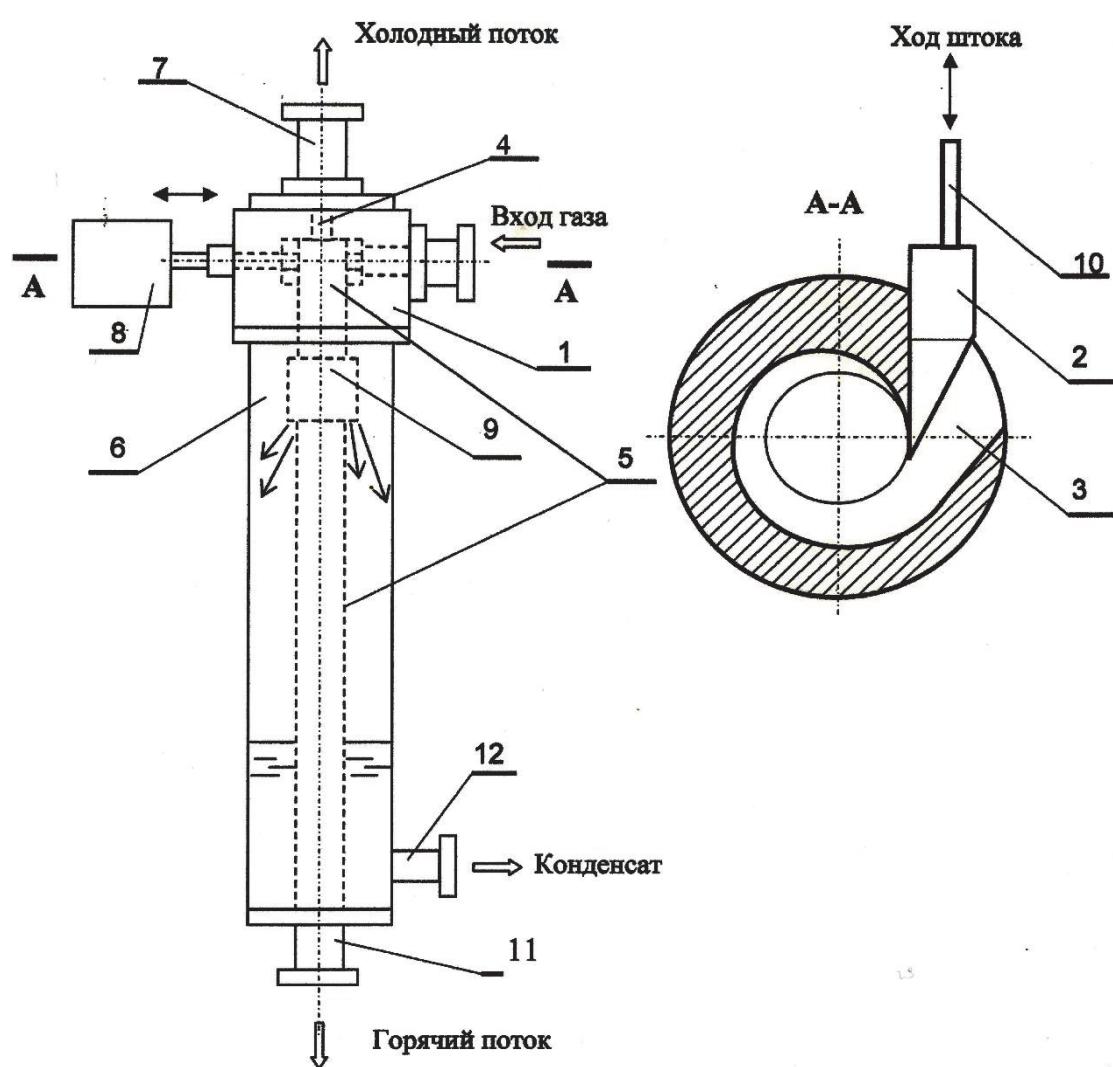


Рис. 2. Принципиальная схема трехпоточной вихревой трубы

сепаратора до $T_p = -40^\circ\text{C}$). При этом температура точки росы по влаге (основной критерий кондиции подготовленного газа) составляла после 3S-сепаратора $T_p = -25,0^\circ\text{C}$, а при работе системы НТС без блока – $T_p = -25,2^\circ\text{C}$), т.е. практически находится на одном уровне.

Последнее противоречие подтверждается и весьма небольшим увеличением удельного количества стабильного конденсата при параллельном подключении блока 3S – всего на 5% [11]. Такое небольшое увеличение могло произойти и за счет обычного дросселирования газа в блоке 3S, который, будучи включенным параллельно, существенно разгрузил дроссельную технологию НТС, улучшив тем самым работу основных рекуперативных теплообменников.

Авторы сверхзвукового метода очистки ПНГ никогда не приводят величины реально достигаемого числа Маха – ключевого критерия 3S-технологии. Это вызывает закономерные вопросы, т.к. на фото рис. 3 [11] видна группа манометров, показатели которых дают возможность оценить этот критерий. Из фото можно сделать интересное (и немаловажное) наблюдение. Газ на входе в 3S-сепаратор имеет температуру ниже нуля (вводный трубопровод обморожен). В средней части аппарата обморожение пропадает, значит, внутренний высокоскоростной поток газа нагревается. В рабочей камере после расширения его температура вновь становится отрицательной. Такую ситуацию (нагрев газа при сверхзвуковом истечении) легко объяснить генерированием ударных волн при возникновении скачков уплотнений.

Теперь коснемся вопроса о сверхзвуковом течении в вихревых трубах. Он неоднозначен и до сих пор дискутируется в технической литературе. Ряд авторов придерживается “принципа максимального расхода”, т.е. невозможности интегрального сверхзвукового истечения газа из соплового ввода ВТ. В то же время допускается наличие локальной сверхзвуковой скорости ($V > V_{kp}$) на периферийном радиусе вихревой трубы. Некоторые авторы допускают наличие интегральной сверхзвуковой скорости истечения газа из сопла, однако не приводят каких-либо подтверждающих экспериментальных данных.



Рис. 3. Внешний вид 3S-сепаратора в рабочем состоянии

Зато эти данные имеются в работе Ю.В. Чижикова, где ему удалось при работе на воздухе не только экспериментально установить наличие сверхзвукового потока в ВТ, но и предложить эмпирическую зависимость значения числа Маха от доли холодного потока [12].

Дальше всех в этом вопросе продвинулся автор патента [13], разработав многосопловое регулируемое устройство ввода газа в ВТ, позволяющее не только достичь сверхзвуковой скорости потока, но и направить его в осевом направлении камеры энергетического разделения. Позитивные данные о практическом применении такого устройства при работе на ПНГ приведены в работе [10].

Представляют интерес данные работы [12], где на основании выше приведенных соотношений оценивались параметры высокоскоростного потока в сопловом вводе ВТ при эксплуатации на природном газе и ПНГ. Это дало возможность рассчитать фазовое равновесие углеводородных компонентов и сравнить их с результатами аналитического контроля. Результаты таких расчетов приведены в табл. 1. Из таблицы видно, что сверхзвуковое течение в ВТ имеет место как при небольшой доле холодного потока μ ($\mu = \frac{V_x}{V}$), так и при полностью закрытом регуляторе x на горячем потоке ($\mu = 1,0$). Например, для высокопроизводительной регулируемой двухпоточной вихревой трубы (ДВТ) (внешний вид на рис. 4) значение числа Маха составило $M = 1,6$.

Таблица 1. Значения числа Маха на различных модификаций вихревых труб.

Тип ВТ, газ	Расход (max) нм ³ /час	P _{вх} , МПа	π	μ	T _x , °C	T _{ст} , °C	M
ДВТ, природный	52 000	4,40	4,7	0,3	-32	-70	1,60
ТВТ, природный	5 000	0,56	4,0	0,2	0	-68	1,75
ТВТ, попутный	3 200	2.6	3,2	1,0	-5	-35	1,13

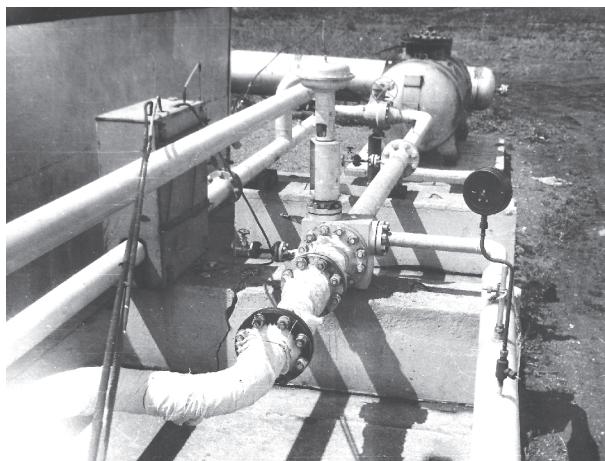


Рис. 4. Внешний вид регулируемой двухпоточной вихревой трубы (холодный поток теплоизолирован)

В заключение акцентируем внимание читателя на принципиальном отличии двух конкурирующих технологий – возможности генерации холода. Как уже упоминалось выше, холодопроизводительность 3S-сепаратора не превышает уровня обычного дросселя (а скорее ниже, из-за возможного ударного нагрева). Поэтому при работе 3S-сепаратора в рекуперативных схемах нельзя получить уровень температур сепарации ниже, чем в дроссельной установке НТС. А при работе ВТ в схемах с рекуперативными теплообменниками уровень температур сепарации получается заведомо ниже.

Приведем конкретный пример по установке подготовки ПНГ с высокорасходными ТВТ (два аппарата производительностью по 160 тыс. $\text{nm}^3/\text{час}$; рис.5) [14]. При эксплуатации были зафиксированы режимы работы низкотемпературной системы (теплообменник T1 → сепаратор C1 → расширитель → сепаратор C2 → теплообменник T1) только на дросселе и только на ТВТ. Эти результаты представлены в табл. 2. Как видно из



Рис. 5. Внешний вид высокопроизводительных ТВТ

таблицы, температура смешанного потока после ТВТ существенно ниже, чем на выходе из дросселя (читай: минимальная температура после 3S-сепаратора). Значит и температура точки росы будет ниже и составлять как минимум (-25 °C) – в соответствии с температурой торможения смешанного потока.

Отношение давлений на ТВТ в данном примере равно $\pi_{\text{TVT}} = 2,38$ (перепад давлений – 3,53 МПа). Такое значение отношения давлений ($\pi_{\text{TVT}} > 2,0$) позволяет говорить как минимум о звуковом течении ПНГ в сопловом сечении ТВТ, а значит о соответствующем процессе конденсации углеводородных компонентов и последующей их сепарации в ТВТ. Расчет по равновесию показал, что в этом случае при $P_{\text{ct}} = 3,46$ МПа и $T_{\text{ct}} = -34,7$ °C температура точки росы по

Таблица 2. Сопоставление режимов работы УПГ на дросселе и на ТВТ

Технологический поток	Давление, МПа		Температура, °C	
	Дроссель	ТВТ	Дроссель	ТВТ
Вход сырого газа в теплообменник T1	5,44	5,38	24	25
Выход из T1; вход в сепаратор C1	5,43	5,36	3	0
Выход из C1; вход в расширитель	5,43	5,36	4	1
Выход из расширителя; вход в C2	1,98	1,83 *	-15	-26 *
Выход из C2; вход сухого газа в T1	1,97	1,82	-15	-25
Выход осущенного газа из T1	1,96	1,82	13	13

*) смешанный поток после ТВТ

углеводородам при идеальной сепарации жидкой фазы должна составлять $T_p = -39^{\circ}\text{C}$. Эта температура выходит на уровень точки росы после 3S-сепаратора при $\pi_{3S} = 1,70$ (перепад давлений 5,0 МПа).

Приведенные цифры сравнения только иллюстрируют возможности двух расширителей, но чтобы выполнить объективную оценку, необходим достоверный спектр режимов эксплуатации 3S-сепараторов и технологических схем на их основе в промышленных условиях. Анализ доступной информации по 3S-сепараторам выявил оптимальный диапазон отношения давлений для их эффективной работы – $\pi_{3S} = 1,31 - 1,86$ (среднее 1,60). Для ТВТ этот диапазон также вполне приемлем. Так, например, ТВТ Капитоновского месторождения эксплуатируется при $\pi_{TBT} = 1,52$ [15], Добринского – в среднем при $\pi_{TBT} = 1,20$ [16], а сепарирующая ТВТ Загорского месторождения вообще работает в диапазоне $\pi_{TBT} = 1,07 - 1,17$ [17].

5. ВЫВОДЫ

1. Рассмотренные теоретические и технические аспекты процессов газодинамической очистки попутных нефтяных газов доказывают перспективность данной технологии для сокращения вредных газовых выбросов в атмосферу при сжигании “хвостов” нефтедобывающей отрасли России.

2. Приведены примеры промышленного применения 3S-сепараторов и трехпоточных вихревых труб в низкотемпературных технологических схемах. Показаны сильные и слабые стороны газодинамических аппаратов.

3. Констатируется, что в настоящее время в России бульшее промысловое применение нашли вихревые трубы. Для объективного сравнения конкурирующих технологий нужны данные по промышленной эксплуатации 3S-сепараторов.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – скорость звука в газе, м/сек

C_p – теплоемкость, ккал/кг $^{\circ}\text{C}$

k – показатель адиабаты, б/р

M – число Маха, б/р

P – давление, МПа

R – газовая постоянная, ккал/кг · град

T – температура, $^{\circ}\text{C}$

T_p – температура точки росы, $^{\circ}\text{C}$

V – скорость потока газа, м/сек

V – расход газа, $\text{нм}^3/\text{час}$

π_{3S} – отношение давлений на 3S-сепараторе, ата/ата

π_{TBT} – отношение давлений на ТВТ, ата/ата

μ – доля холодного потока, б/р

ИНДЕКСЫ

в – вход в аппарат

вых – выход из аппарата

ст – статический параметр

х – холодный поток

АБРЕВИАТУРЫ

НТС – низкотемпературная сепарация

ПНГ – попутный нефтяной газ

ВТ – вихревая труба

ТВТ – трехпоточная вихревая труба

ДВТ – двухпоточная вихревая труба

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Темпель Ф.Г. Разработка газовых месторождений и транспортировка газа. Л., Недра, 1970. 252 с.
2. Garret R.L., Ochschlager W.K., Tomich J.F. Vapor-liquid separation at Supersonic velocities // Trans. Asme, 1968, B, 4, p. 609-612.
3. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Т1. М., 1991, 600 с.
4. Вуколович М.П. Термодинамика. М., 1972, 670 с.
5. Alfyorov V.I., Bagirov L.A., Dmitriev L.M., Feygin V., Imaev S., Lacey J.R. Supersonic nozzle efficiently separates natural gas components // Oil & Gas Journal. May 23. 2005. pp. 53 - 58.
6. Фарахов Т.М., Исхаков А.Р., Минигулов Р.М. Высокоэффективное сепарационное оборудование очистки природного газа от дисперсной среды // Электронный научный журнал “Нефтегазовое дело”. 2011. № 6. С. 263-277.
7. Жидков М.А., Девисилов В.А., Жидков Д.А., Гусев А.П., Рябов А.П. Трехпоточные вихревые трубы – экологическая значимая альтернатива сжиганию попутного нефтяного газа на факелах // Безопасность в техносфере. 2013. № 3. С. 19-27.
8. Жидков М.А., Рябов А.П., Гусев А.П., Жидков Д.А. Трехпоточные вихревые трубы в нефтедобывающей и газовой промышленности // Нефть. Газ. Новации. 2009. № 2. С. 66-70.
9. Жидков М.А., Рябов А.П., Гусев А.П., Жидков Д.А. Регулируемые вихревые трубы, эксплуатируемые в нефтегазовой и химической промышленности // Нефть. Газ. Новации. 2009. № 11-12. С. 99-104.
10. Хаит А.В. Исследование эффекта энергоразделения с целью улучшения характеристик вихревой трубы. Дисс. ... канд. техн. наук. 2012, Омск, 199 с.
11. Сверхзвуковые технологии (3S-технологии) подготовки и переработки природного и попутного газа // Презентация ЗАО “О.Б.Л. “Нефтепродукт”, 2008, Интернет, 16 с.
12. Жидков М., Гусев А., Рябов А., Овчинников В., Жидков Д. Сверхзвуковая сепарация углеводородных газов в вихревых трубах Ранка-Хилла // OIL&GAS JOURNAL, 2007. № 3-4. С. 101-106.
13. Ловцов А.В. Вихревая труба // Патент РФ № 2370710, 2008.
14. Жидков М.А., Бунятов К.Г., Иванов Р.Н., Габдулхаков А.Х., Спиридонов В.С., Кирикова О.В., Жидков Д.А. Температурная эффективность высокорасходных ТВТ на установке подготовки нефтяного газа Комсомольского месторождения (опыт пусконаладки) /

- / Нефть. Газ. Новации. 2012. № 5. С. 46-52.
15. Жидков М., Гусев А., Бетлинский В., Солдатов П., Овчинников В., Рябов А. Трехпоточная вихревая труба успешно эксплуатируется на Капитоновском месторождении // OIL&GAS JOURNAL RUSSIA. 2008. № 1-2. С. 42-46.
16. Жидков М.А., Жидков Д.А., Лаптев Е.Н., Сытин А.Г., Намазов М.О. Особенности работы ТВТ Добринского месторождения (опыт пусконаладки) // Нефть. Газ. Новации. 2010. № 9. С. 6-11.
17. Гусев А., Рябов А., Жидков М. Исламкин В., Пахомова Г. Подготовка нефтяного газа к транспорту с использованием трехпоточных вихревых труб // OIL&GAS JOURNAL. 2007. №1-2. С. 90-95.

GAS-DYNAMIC CLEANING OF ASSOCIATED GAS – THE WAY TO IMPROVE THE ECOLOGY OF THE PLANET

© 2014 V.A. Devisilov, D.A. Zhidkov

Bauman Moscow State Technical University

This article discusses the theoretical and practical aspects of the gas-dynamic method of cleaning associated petroleum gas (with an emphasis on vortex tubes Rank-Hilsch) allowing discharging successfully extinguish discharging torches. Thereby solved not only environmental but also economic issues reduction of losses in Russia.
Keywords: double-flow vortex tube, three-flow vortex tube, vortex unit, chilling capacity, 3S-separation, natural gas, associated petroleum gas, condensate, technological scheme, temperature, pressure, flow rate.

Vladimir Devisilov, Candidate of Technics, Associate Professor,
E-mail: devisilov@bmstu.ru
Dmitry Zhidkov, Graduate Student. E-mail: grena_der@mail.ru