

Вихревая технология стратификации газов для решения экологических вопросов в нефтегазовых и химических производствах (обзор)

Д.А. Жидков, аспирант

В.А. Девисилов, первый зам. зав. кафедрой, канд. техн. наук, доцент

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

e-mail: grena_der@mail.ru, devisil@mail.ru

Ключевые слова:

вихревой эффект, экология, очистка газа, двухпоточная вихревая труба, трехпоточная вихревая труба, вихревая установка, холодопроизводительность, энтальпийный баланс, природный газ, попутный нефтяной газ, сбросной газ, воздух, конденсат, ударно-волновой механизм.

Одна из важных задач охраны окружающей среды и экономики России – разработка и реализация энерго- и ресурсосберегающих [технологий, позволяющих наиболее эффективно использовать первичные и вторичные ресурсы. В нефтегазовой и химической промышленности широко используются процессы, в которых потенциальная энергия давления углеводородных или сбросных газов либо теряется, либо утилизируется с минимальной эффективностью. Теряемую энергию целесообразно использовать для низкотемпературной очистки сбросных и подготавливаемых газов, уменьшая тем самым загрязнение окружающей среды. Один из путей решения этой проблемы состоит в использовании вихревой технологии, основанной на вихревом эффекте Ранка–Хилша. Данный способ очистки по эффективности многократно превышает стандартные способы с применением дросселирования. В обзоре представлен анализ теоретических и технологических аспектов исследования вихревого эффекта. Рассмотрены различные конструкции вихревых труб, а также одно из важных условий их эксплуатации и реализации в промышленности – регулирование входящего потока. Показано, что реализация рекуперативной схемы с вихревыми трубами позволит улучшить экологические и экономические показатели основной технологии. Дан критический обзор существующих теорий эффекта Ранка–Хилша. Рассмотрены перспективы развития ударно-волнового механизма вихревого эффекта, позволяющего объяснить избыточную холодопроизводительность трёхпоточных вихревых труб, используемых для подготовки попутного нефтяного газа к транспортировке.

1. Вихревая труба как устройство для терморазделения газов. Термодинамические параметры и геометрические соотношения

Эффект терморазделения (стратификации) газов был случайно открыт французским инженером Жоржем Жозефом Ранком, которому 12 декабря 1931 г. выдан патент № 743111 (вихревая труба). Парадоксальность открытия Ж. Ранка иллюстрируется тем, что его сообщение на заседании Французского

физического общества было встречено с большим скепсисом, а опытные данные [1] объявлены ошибкой эксперимента.

Во время Второй мировой войны немецкий ученый Р. Хилш начал в Эрлангенском университете¹ обстоятельное исследование вихревого эффекта, которое было опубликовано в Германии уже после войны [2]. Это положило начало широкому исследованию вихревого эффекта в США и СССР (1950-е годы),

¹ Университет Эрлангена–Нюрнберга (Эрлангенский университет, Университет имени Фридриха–Александра в Эрлангене и Нюрнберге, нем. Friedrich-Alexander-Universität. Erlangen-Nürnberg) — университет в Германии.

а далее практически во всех индустриально развитых странах мира. Так, к началу XXI в. было опубликовано более 2000 статей, монографий и патентов по данной тематике [3].

В СССР в этом направлении наиболее плодотворно работала кафедра «Теплотехника» Куйбышевского авиационного института во главе с профессором А.П. Меркуловым [4]. Вихревые трубы (ВТ) изучали и внедряли в промышленность известные ученые и инженеры — А.И. Азаров, В.П. Алексеев, В.М. Бродянский, Л.А. Вулис, М.А. Гольдштик, М.Е. Дейч, М.Г. Дубинский, М.А. Жидков, В.И. Кузнецов, И.Л. Лейтес, А.И. Малышев, В.С. Мартыновский, В.И. Метенин, Ш.А. Пиралишвили, В.А. Сафонов, А.Д. Суслов, В.Е. Финько, И.Л. Ходорков, Ю.В. Чижиков и др. Среди зарубежных ученых вклад в теоретическое и экспериментальное изучение вихревого эффекта внесли Д. Вебстер, Р. Касснер, Д. Кейс, К. Линдерстрем-Ланг, М. Огава, Б. Парулейкар, Д. Рейнольдс, М. Сибулкин, Н. Сода, Х. Тахакама, С. Фултон, Д. Хартнет, Г. Шепер, Ф. Шульц-Грюнов, Е. Эккерт, Х. Якахама и др.

Следует отметить, что после 80 лет изучения многое остается неясным в механизме вихревой стратификации газа. До сих пор не создана адекватная общепризнанная физико-математическая модель этого газодинамического феномена. Можно сказать, что здесь каждый исследователь идет своим путём. И можно вполне согласиться с высказыванием авторов [5], что «претензии авторов различных гипотез на общее описание процесса с единых позиций приводят к противоречиям их положений с некоторыми фактами работы ВТ».

Вихревой эффект, или эффект Ранка-Хилша, реализуется в процессе течения интенсивно закрученного потока газа по осесимметричному цилиндрическому каналу (вихревой камере — ВК) диаметром $D_{\text{тр}}$ (рис. 1). На торцевых концах ВК имеются ограничительные элементы — диафрагма с центральным отверстием диаметром d_d , из которого истекает охлажденная часть исходного закрученного газа (холодный поток), и дроссель, через который выходит из ВК подогретая его часть (горячий поток).

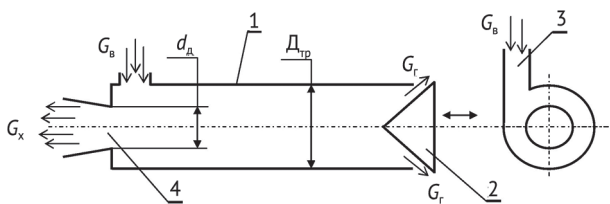


Рис. 1. Схема противоточной вихревой трубы:
1 — камера терморазделения; 2 — дроссельное устройство; 3 — сопловой ввод; 4 — диафрагма

На основании закона сохранения вещества можно составить уравнение баланса массы по потокам ВТ:

$$G_{\text{в}} = G_{\text{х}} + G_{\text{г}}, \quad (1)$$

а на основании первого начала термодинамики — классический тепловой баланс в удельной энтальпийной форме:

$$i_{\text{в}} = \mu i_{\text{х}} + (1 - \mu) i_{\text{г}}, \quad (2)$$

где

$$\mu = \frac{G_{\text{х}}}{G_2} \quad (3)$$

— относительная доля холодного потока.

ВТ работает следующим образом. Сжатый газ поступает внутрь трубы через закручивающий сопловой ввод 3 в виде интенсивно закрученного вихревого потока, перемещающегося вдоль камеры терморазделения 1 от соплового ввода к дроссельному устройству 2. Центробежные силы, действующие на элементы газа в закрученном потоке, приводят к образованию радиального градиента статического давления, который под воздействием процесса диссипации уменьшается по мере удаления от соплового ввода к дросселю. В результате в приосевой области камеры терморазделения формируется осевой градиент давления, направленный от дросселя к диафрагме 4, который формирует возвратное течение газа от дросселя к диафрагме. Соответствующей регулировкой проходного сечения дросселя достигается задаваемый параметр μ . При этом из отверстия диафрагмы за счет возникающего вихревого эффекта истекает охлажденный поток газа с расходом $\mu \cdot G_{\text{в}}$, а через проходное сечение дросселя — подогретый поток с расходом $(1 - \mu) \cdot G_{\text{в}}$.

Чаще всего ВТ используют как устройство для получения охлажденного газа. Это определяет внешние интегральные характеристики термодинамического совершенства ВТ, широко используемые исследователями и практиками. В первую очередь к ним необходимо отнести абсолютные эффекты снижения температуры охлажденного потока:

$$\Delta T_{\text{х}} = T_{\text{в}} - T_{\text{х}} \quad (4)$$

и повышения температуры подогретого потока:

$$\Delta T_{\text{г}} = T_{\text{г}} - T_{\text{в}}. \quad (5)$$

Эффекты охлаждения $\Delta T_{\text{х}}$ и подогрева $\Delta T_{\text{г}}$ газа в ВТ зависят от ряда параметров режимного и геометрического характера. Для конкретной конструкции ВТ значения величин $\Delta T_{\text{х}}$ и $\Delta T_{\text{г}}$ есть, прежде всего, функция доли холодного потока μ .

Считая газ идеальным, т.е. пренебрегая зависимостью теплоемкости от температуры, ранее приведенное выражение (2) сводится к зависимости между эффектами охлаждения (ΔT_x) и подогрева (ΔT_r) газа в ВТ:

$$\Delta T_x = \frac{1-\mu}{\mu} \cdot \Delta T_r. \quad (6)$$

Выражение (6) позволяет по эффектам терморазделения рассчитать для адиабатной (не имеющей внешнего теплообмена) вихревой трубы долю холодного потока μ :

$$\mu = \frac{\Delta T_r}{\Delta T_r + \Delta T_x}. \quad (7)$$

Для неидеального газа — воздух высокого давления, углеводородные и другие газы — необходимо при расчете μ вводить поправку на эффект дросселирования ($\Delta T_{др}$). Тогда выражение (7) примет вид:

$$\mu = \frac{\Delta T_r + \Delta T_{др}}{\Delta T_r + \Delta T_x}. \quad (8)$$

Если не учитывать теплообмен ВК с окружающей средой (который практически отсутствует при хорошей теплоизоляции), большинство конструкций современных ВТ можно отнести к числу адиабатных ВТ. В то же время существует класс различных по своему конструктивному исполнению так называемых неадиабатных ВТ, в которых с целью повысить эффект охлаждения холодного потока производится теплосъем обычно с внешней поверхности ВК. В этом случае уравнение сохранения энергии будет содержать дополнительное слагаемое, учитывающее отвод теплоты от вихревой камеры.

$$i_2 = \mu \cdot i_x + (1-\mu) \cdot i_r + q_{охл}. \quad (9)$$

Здесь $q_{охл} = \frac{Q_{охл}}{G_B}$ — отведенный тепловой поток.

Термодинамические характеристики ВТ обычно представляются в виде зависимости эффектов охлаждения и подогрева газа от определённого параметра (аргумента), в качестве которого используют либо долю холодного потока μ , либо второй, определяющий вихревой эффект параметр — отношение абсолютных давлений (или степень расширения) π :

$$\pi = \frac{P_B}{P_x} \quad (10)$$

Обычно максимальные значения эффектов охлаждения ΔT_x наблюдается при $\mu = 0,2 - 0,3$, а эффектов подогрева ΔT_r — в области $\mu = 0,85 - 0,95$. С ростом отношения давлений π величины ΔT_x и ΔT_r также возрастают, но до определенного предела.

Не менее важные характеристики ВТ — удельная холодо- и теплопроизводительность, определяемые следующими соотношениями:

$$q_x = \mu \cdot \Delta T_x; q_r = (1-\mu) \cdot \Delta T_r. \quad (11)$$

Многочисленные исследования и практика показывают, что максимальная удельная холодопроизводительность q_x наблюдается при относительно больших значениях μ — при $0,6 < \mu < 0,8$ [4, 6, 7].

По величине ΔT_x сравнивают различные конструкции вихревых труб, работающих в сопоставимых технологических условиях. Начиная с Р. Хилша [2], для оценки совершенства процесса стратификации стали использовать безразмерные параметры — температурный коэффициент полезного действия (η_T) и адиабатный коэффициент полезного действия ($\eta_{ад}$):

$$\eta_B = \frac{\Delta T_x}{\Delta T_s}, \quad (12)$$

$$\eta_{ад} = \mu \cdot \eta_B, \quad (13)$$

где ΔT_s — эффект понижения температуры газа при изоэнтальпийном расширении от давления P_B до давления P_x .

Значение ΔT_s можно рассчитать по соотношению:

$$\Delta T_s = \Delta T_B \cdot \left[1 - \left(\frac{1}{\pi} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (14)$$

где $k = \frac{C_p}{C_v}$ — показатель адиабаты.

Таким путем сравнивают эффективность ВТ с эффективностью идеального турбодетандера.

Обычно температурный к.п.д. η_T используется при оценке температурной эффективности ВТ, когда имеет место максимальное охлаждение газа (ΔT_x^{max}). Большинство исследователей, совершенствуя конструкцию вихревых труб, стремились в первую очередь к увеличению ΔT_x^{max} и, соответственно, величины η_T^{max} . Так, лучшие современные ВТ имеют значения температурного к.п.д. $\eta_T^{max} = 0,70$ [7], приближающееся к температурному к.п.д. реального детандера. Но если учесть долю холодного потока μ , т.е. посчитать адиабатный к.п.д., то он будет не столь оптимистичным — $\eta_{ад}^{max} = 0,25$.

Разработаны и другие методики оценки эффективности ВТ, основанные, например, на расчете показателя политропы n , который практически инвариантен к отношению давлений π и температуре на входе в вихревую трубу T_B . Это позволяет сравнивать термодинамические характеристики ВТ как бы при одинаковых условиях эксплуатации по параметрам π и T_B [8]. При этом сопоставление ведут по приведенному показателю эффективности θ , который соотносит показатель политропы n конкретной ВТ с максимально достигнутой величиной показателя политропы (n_{\max}) в ряду сравниваемых труб.

Характеристики вихревой трубы существенно зависят от формы и протяженности вихревой камеры, конструктивного оформления входного и выходных элементов, их геометрии и соотношения размеров. Для удобства сопоставления экспериментов на разных типоразмерах ВТ введены относительные величины: относительная площадь соплового ввода $\bar{F}_c = F_c / F_{\text{тр}}$, относительный диаметр отверстия диафрагмы $\bar{d}_d = d_d / D_{\text{тр}}$, относительная длина вихревой камеры $\bar{L}_{\text{тр}} = L_{\text{тр}} / D_{\text{тр}}$. Эти геометрические соотношения используются при анализе практически всех ВТ различного конструктивного исполнения.

Один из важнейших факторов ВТ — конструктивное исполнение закручивающих устройств. Виды последних весьма многочисленны и разнообразны. Они достаточно подробно описаны в [6]. В данном обзоре акцентируется внимание на применяемых в нефтегазовой и химической технологии закручивающих устройствах с тангенциальным подводом высоконапорного газа. Практически во всех отечественных монографиях, посвященных вихревому эффекту, приведена классификация известных в настоящее время устройств [4, 6, 7, 9]. По форме они бывают круглые и прямоугольные; по типу соплового ввода — спиральные, чисто тангенциальные и тангенциально-лотковые; по конструктивному исполнению — наклонные и прямые (по отношению к оси ВТ), одно- и многосопловые. Наиболее прост в изготовлении круглый тангенциальный ввод. Однако он значительно уступает по температурной эффективности спиральному вводу с прямоугольным сечением. Это наиболее распространенное конструктивное исполнение закручивающих устройств ВТ, работающих как на воздухе, так и на газах и газовых смесях химических и нефтегазовых производств. Отечественные разработчики предпочитают применять прямые (под углом 90° к оси ВТ) сопла, в котором закручивающая поверхность очерчена, как правило, двумя сопрягающимися окружностями.

Согласно экспериментам А.П. Меркулова [4], оптимальное соотношение ширины b_c и высоты h_c сопла

в критическом (выходном) сечении прямоугольного канала составляет $b_c / h_c = 2/1$. Однако автор [10] убедительно показал, что изменение соотношения b_c / h_c с 1,1 до 2,1 слабо влияет на эффективность вихревой трубы. Подобные результаты были получены также в экспериментах на природном газе высокого давления при $\mu = 0,7$ (режим максимальной холодопроизводительности) [11]. Здесь за оптимальное отношение сторон прямоугольного спирального односоплового ввода принят диапазон отношений $b_c / h_c = 1,0-2,0$.

В технической литературе неоднократно дискутировался вопрос об оптимальном количестве вводных сопел. С одной стороны, исходя из превалирующей теории турбулентного энергопереноса (см. далее), логична предпосылка, что чем меньше толщина вводимого тангенциального слоя, тем выше равномерность полей скоростей и давлений в сопловом сечении вихревой трубы и тем эффективнее процесс разделения газа. Такое условие может обеспечить многосопловой тангенциальный ввод, и чем больше количество сопел, тем эффективнее ВТ должна быть выше. С другой стороны, при односопловом вводе наблюдается явно выраженная радиальная неравномерность, вызванная значительным линейным размером высоты вводимого закрученного потока. Однако экспериментальные данные многих авторов показали преимущество именно односоплового спирального ввода.

Данное противоречие хорошо иллюстрирует рис. 2, на котором представлены зависимости $\Delta T_x = f(\mu)$ для трех видов прямоугольных многосопловых тангенциальных вводов и для одного прямоугольного соп-

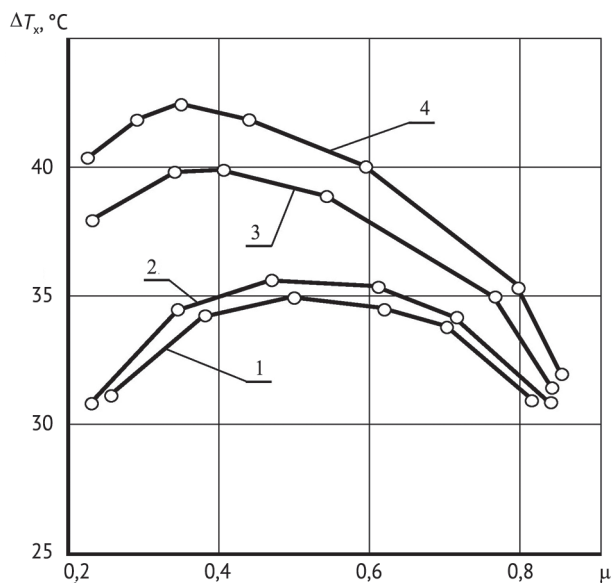


Рис. 2. Зависимость ΔT_x от μ для прямоугольных сопловых вводов: 1 — три сопла, 2 — четыре сопла, 3 — двенадцать сопел; 4 — прямоугольный односопловой ввод [7]

ла со спиральным вводом [7]. Как видно из рисунка, односплоевой ввод имеет температурное преимущество во всем диапазоне значений μ .

Важным критерием, влияющим на эффективность работы вихревой трубы, является упомянутая выше относительная площадь соплового ввода \bar{F}_c . Увеличение этого критерия приводит к повышению расхода газа через ВТ и к росту ΔT_x , но только до тех пор, пока в выходном отверстии диафрагмы не наступит критическое истечение. Дальнейшее повышение \bar{F}_c ухудшает процесс энергопереноса и снижает эффективность ВТ. В диапазоне давлений $0,2 \leq P_b \leq 8,0$ МПа автор [4] рекомендует выбирать относительную площадь соплового ввода в пределах:

$$0,085 < \bar{F}_c < 0,100. \quad (15)$$

Причем при повышении P_b оптимальное значение \bar{F}_c стремится к нижнему пределу.

Важный элемент конструкции вихревой трубы — диафрагма. Ее относительный диаметр \bar{d}_b зависит от ряда факторов. А.П. Меркулов одним из первых установил, что для каждого значения μ существует свое оптимальное значение \bar{d}_b . Он же дал эмпирическое значение этой зависимости:

$$\bar{d}_b = 0,350 + 0,313 \cdot \mu. \quad (16)$$

В большинстве современных конструкций вихревых труб диафрагма выполняется в виде конического диффузорного канала длиной $(2-3) D_{тр}$ и с углом конусности $10-15^\circ$. Это позволяет несколько снизить уровень давления газа на оси ВТ, что равносильно повышению отношения давлений μ .

Эффективность терморазделения газа в ВТ в значительной степени зависит от длины и геометрической формы вихревой камеры. Данный вопрос достаточно подробно освещен в технической литературе [4, 6, 7, 12]. Экспериментально установлено, что оптимальная относительная длина цилиндрической ВК без дополнительных тормозящих устройств на горячем потоке (крестовины, сетки, диффузоры) составляет $L_{тр} = 20-25$ (и выше). Применение тормозящих устройств (различного рода крестовины, сетки, диффузоры и пр.), а также конической или комбинированной формы вихревой камеры позволяет сократить относительную длину ВК до $L_{тр} = 5-10$.

Успешная реализация вихревой технологии в высокопроизводительных системах нефтегазовой и химической промышленности зависит не только от термодинамической эффективности ВТ, но и от простоты изготовления аппаратов, от их долговечной и надёжной работы. Поэтому здесь неприемлемы

какие-либо сложные технические решения как при конструировании закручивающих устройств, так и при оформлении вихревой камеры (например, коническая или ступенчатая формы ВК, сложные тормозящие устройства, как на горячем, так и на холодном потоках, конусные регуляторы соотношения потоков и пр.). В связи с этим практиками взят курс на предельное упрощение промышленных конструкций ВТ, естественно, не в ущерб их эффективности.

2. Основные модификации двухпоточных вихревых труб (ДВТ). Проблема регулирования производительности

За время исследования вихревых труб предложено и реализовано значительное количество их конструктивных модификаций. Все возможные типы ВТ можно условно разделить на две группы: первая — холодо- и теплообразующие ВТ (генераторы холода и тепла), вторая — сепарирующие трубы, которые имеют один входящий и три выходящих потока (трехпоточные вихревые трубы — ТВТ), они не только стратифицируют исходный высоконапорный газ, но и отделяют (сепарируют) образующийся конденсат — так получается третий, выходящий из ВТ поток. В данном разделе будут рассмотрена первая группа ВТ, представляющих собой двухпоточные вихревые трубы (ДВТ), которые имеют два выхода (холодный и горячий потоки) и применяются в основном в машиностроении и в химической промышленности. Трёхпоточные вихревые трубы, которые применяются в основном в нефтегазовой промышленности, будут рассмотрены в разделе 3.

На рис. 1 изображена двухпоточная вихревая труба, которая также называется «противоточной». В ней выходящие потоки направлены в противоположные стороны. Это основная эксплуатируемая в промышленности модификация. Экспериментально исследована также ВТ, называемая «прямоточной». Она схематично показана на рис. 3.

Её принципиальное отличие — организация холодного и горячего потоков с одной стороны ВК. Рождённая теоретическими соображениями, данная

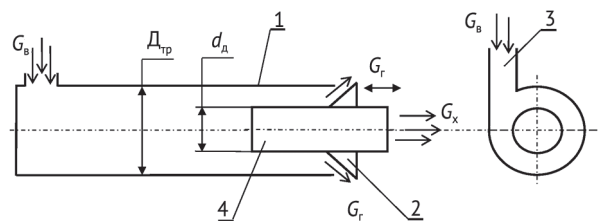


Рис. 3. Схема прямоточной вихревой трубы: 1 — камера терморазделения; 2 — дроссельное устройство; 3 — сопловой ввод; 4 — диафрагма

конструкция оказалась малоэффективной [13] и на практике практически не используется.

Определённый интерес представляют так называемые двухконтурные вихревые трубы (с дополнительным потоком). Это обычная противоточная ВТ, где в присоединяемую зону ВК со стороны дросселя вводится дополнительный поток газа. Исследования такого типа ВТ показали, что их максимальная холодопроизводительность достигается на режимах, когда расходы охлаждённого и дополнительного потоков равны [6]. Считается, что двухконтурные ВТ позволяют сократить потребляемую мощность на получение определённого количества холода. Однако, несмотря на значительное количество исследований [6, 14, 15], двухконтурные ВТ пока не нашли широкого применения в промышленности. Это связано, по-видимому, с усложнением конструкции самой ВТ (дополнительный поток также приходится закручивать), усложнением технологической схемы, а также с необходимостью иметь газ с промежуточным давлением. Всё это не компенсируется некоторым снижением мощности на получение нужного холода.

Повысить эффективность ВТ как генератора холода можно не только за счет внутреннего отвода теплоты подогретым потоком газа, но и за счет дополнительного охлаждения внешней поверхности ВК каким-либо охладителем. Это может быть вода, рассол хлористого кальция, газовый конденсат, пропан, фреон и прочие охлаждающие жидкости. Также может быть использован внешний обдув ВК воздухом или обеспечено снятие теплоты за счет обычной конвекции. Такого рода ВТ называются «неадиабатными». Схема такой ВТ для случая охлаждения жидкостью приведена на рис. 4. Здесь дополнительно к классической конструкции ВТ имеется кожух 5, в который для отбора теплоты от стенки ВК подаётся жидкий агент.

Одна из первых охлаждаемых ВТ была разработана Е.Н. Оттенем [16]. Значительные экспериментальные исследования неадиабатной ВТ с охлаждением водой были выполнены в Московском энергетическом институте (МЭИ) на ВТ с внутренним диаметром

соплового сечения $D_{тр} = 28$ мм [7]. Установлено, что неадиабатная ВТ наиболее эффективна по сравнению с адиабатной на режимах $0,6 < \mu < 1,0$.

Значительный вклад в изучение и практическое применение неадиабатных ВТ внёс А.И. Азаров [17]. Им разработан и внедрен в промышленность широкий спектр ВТ с диапазоном диаметра $D_{тр} = 5-38$ мм, охлаждаемых как жидкостью, так и воздухом. Это одно- и многокамерные пластинчатые ВТ, неадиабатные ВТ с наружным и внутренним оребрением камеры, с рециркуляцией горячего потока, с осевым вводом сжатого воздуха и др. А.И. Азаровым подтверждён вышеуказанный диапазон эффективности неадиабатных ВТ по μ .

Как указывалось выше, вихревой эффект терморазделения газа, открытый Ж. Ранком в 1931 г. и экспериментально изученный Р. Хилшем в 1946 г., не только начал интенсивно изучаться, но и нашел во второй половине XX в. широкое применение для термостатирования (охлаждения–нагрева) различных технических объектов. При этом в качестве рабочего тела использовался самый распространенный в природе газ — воздух — как самым безопасный при применении в холодильных системах.

С начала 1960-х годов неоднократно предпринимались попытки использовать данный эффект для целей газовой, нефтяной и химической промышленности в низкотемпературных технологиях разделения газовых смесей. Это было обусловлено наличием в указанных областях (далеко небезупречных с экологической точки зрения) производства «даровой» энергии, часто теряемой при дросселировании. Стендовые и опытно-промышленные испытания на реальных промышленных газах продемонстрировали эффективность и надежность работы вихревых генераторов холода, но эти исследования не были доведены до реализации в промышленном масштабе. Основная причина такой ситуации заключалась в постоянной (фиксированной) геометрии тангенциальных сопловых вводов ВТ, что не позволяло регулировать ее пропускную способность, как это делается на обычных дроссельных регуляторах, причем в автоматическом режиме. На схемах рис. 1, 3 и 4 сопловой ввод ВТ (поз. 3) показан как одинарное сопло прямоугольного сечения. Ясно, что в условиях постоянно меняющихся параметров (давление, расход газа), что имеет место на всех без исключения установках нефтегазовой и химической промышленности, такая ситуация не позволяла внедрять ВТ, как говорится, «в лоб» — производственники не принимали такое техническое решение для промышленной реализации.

Несмотря на значительное количество патентов, а также экспериментов на стендах, вопрос регулирова-

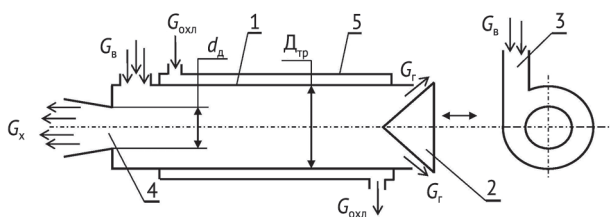


Рис. 4. Схема противоточной неадиабатной вихревой трубы: 1 — камера терморазделения; 2 — дроссельное устройство; 3 — сопловой ввод; 4 — диафрагма; 5 — охлаждающий кожух

ния производительности ВТ оказался весьма непросто при реализации в нефтегазовой и химической промышленности на реальных газовых смесях. Рассмотрим вопрос регулирования производительности вихревых труб подробнее.

Наиболее простой способ изменения производительности ВТ заключается в использовании сменных сопловых вводов. На ранних стадиях исследования и освоения вихревого эффекта применялся в основном такой способ изменения площади соплового ввода, обеспечивающий адаптацию ВТ к относительно стационарным параметрам на входе в ВТ. В настоящее время этот способ широко применяется в системах термостатирования объектов, работающих на воздухе при относительно небольших расходах.

Недостаток приёма со сменными сопловыми вводами при работе вихревых установок (ВУ) в высокопроизводительных отраслях промышленности очевиден: необходимо останавливать систему или переводить ее на резервный расширитель газа (например, дроссель) для разборки аппарата и замены соответствующих узлов и деталей. Такой способ регулирования производительности ВТ вполне допустим при опытной и опытно-промышленной отработке вихревой технологии, что и делалось исследователями в большинстве случаев [3, 4, 6, 7, 9, 11]. Но при эксплуатации промышленных установок, работающих в широком диапазоне расходов и при переменном давлении газа на входе в ВУ, он, естественно, неприемлем.

Для преодоления обозначенной ситуации разработчиками вихревой технологии были предложены определенные приемы регулирования пропускной способности ВТ, позволяющие безостановочно эксплуатировать ВУ и при постоянной геометрии сопла (сопл). Так, авторы [18] разработали схему газораспределительной станции (ГРС) с холодильной камерой на базе нескольких ВТ. При этом диапазон возможных давлений и расходов природного газа разбивался на зоны, в пределах которых работает одна вихревая труба (дискретное регулирование расхода). Переключение труб осуществляется в зависимости от давления газа на входе в ГРС или от расхода газа, направляемого потребителю. Данная схема вихревой установки диктует необходимость создания соответствующей автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУТП), что в условиях ГРС может оказаться нерентабельным. Кроме того, «гребенка» вихревых труб значительно удорожает систему ГРС, занимает дополнительные производственные площади и требует соответствующего обслуживания. По этим причинам такая технологическая схема ВУ не была реализована на практике.

Определенный интерес представляет схемное решение по регулированию расхода природного газа на ГРС с ВТ (рис. 5), представленное в [19, 20]. Здесь двухпоточная вихревая труба выполняет две функции: во-первых, заменяет нерегулируемую дроссельную камеру, что, по мнению авторов [19], повышает надежность работы ГРС в зимний период эксплуатации, и, во-вторых, обеспечивает сепарацию природного газа от жидких включений. Следует, однако, обратить внимание на тот момент, что в данной схеме предполагается очистка не всего потока газа, а только его постоянной части.

Последнее является недостатком предлагаемой схемы, но не особенно существенным, так как природный газ обычно приходит на ГРС подготовленным в соответствии с «СТО Газпром 089–2010» и, как правило, не содержит капельной жидкости. Более того, даже если в газе и будет по какой-либо причине присутствовать жидкая фаза, то для ее сепарации необходимо использовать не ДВТ, а трехпоточную вихревую трубу — ТВТ (подробнее о ТВТ см. далее). В противном случае попавший в сопло ДВТ конденсат будет отброшен центробежными силами на периферию, т.е. в горячий поток, и там испарится. Следовательно, ожидаемый эффект сепарации жидкой фазы не будет достигнут. Хотя данная схема ГРС была рекомендована для реализации в системе «Газпром» [20], она до настоящего времени не нашла своего воплощения на действующих или вновь создаваемых объектах.

В литературе обсуждался еще один прием регулирования производительности ВТ при фиксированной площади соплового ввода, который рекомендуют для

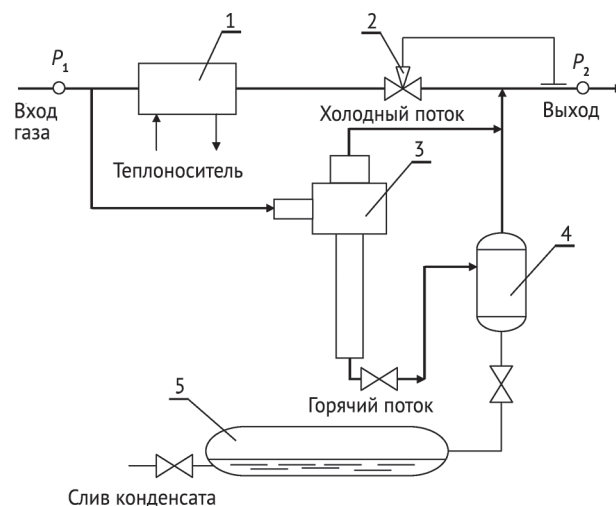


Рис. 5. Принципиальная схема регулятора давления ГРС с вихревой трубой [33, 34]:
1 — подогреватель; 2 — регулятор давления; 3 — двухпоточная вихревая труба; 4 — сепаратор; 5 — сливная емкость

реализации авторы [9]. Он заключается в частичном дросселировании газа перед соплом ВТ, когда необходимо уменьшить расход газа, а также при превышении номинального давления на входе в сопло. Такой прием использовали, например, в Германии при исследовании вихревого эффекта на природном газе [21, 22].

На рис. 6 представлена схема регулирования производительности ВТ, имеющей постоянную геометрию соплового ввода. Как видно из рис. 6, перед ВТ расположено дроссельное устройство, обеспечивающее с помощью АСУТП заданное давление газа после ВТ. Рассмотрим данный способ регулирования производительности ВТ подробнее. Для этого приведем известную формулу определения площади проходного сечения сопла при $p > 2,0$ [11]:

$$F_c = \frac{V_B \cdot \gamma_B}{36 \cdot \alpha_c \cdot P_B} \cdot \sqrt{\frac{Z \cdot R \cdot T_B}{k \cdot g}} \cdot \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}. \quad (17)$$

Как видно из данного соотношения, расчетная площадь сопла при критическом истечении газа прямо пропорциональна расходу газа V_B и обратно пропорциональна давлению P_B на входе в ВТ. Отсюда следует, что для увеличения (уменьшения) расхода газа V_B при $P_B = \text{const}$ необходимо соответственно увеличить (уменьшить) площадь соплового ввода F_c . Если при необходимости поддерживать постоянный расход газа ($V_B = \text{const}$) входное давление P_B колеблется, то при увеличении этого давления площадь сопла (F_c) должна быть уменьшена, и наоборот. Такой алгоритм приемлем для регулируемого сопла, когда есть возможность изменять его геометрию.

Что происходит, если $F_c = \text{const}$ и регулирование нужного параметра возможно только за счет дросселя перед соплом? Рассмотрим случай, когда величина $F_c = \text{const}$ рассчитана на максимальную пропускную

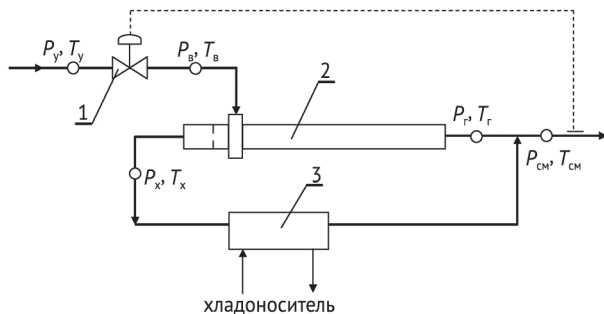


Рис. 6. Способ регулирования производительности вихревой трубы с помощью дросселя на входе [21, 22]: 1 – дроссель; 2 – вихревая труба; 3 – теплообменник для снятия холода

способность вихревой трубы (V_B^{max}) при постоянном (номинальном) давлении газа перед соплом, дающим необходимое отношение давлений π и соответственно необходимую холодопроизводительность ВТ. Тогда, если необходимо понизить расход природного газа, например, вдвое (такая ситуация, например, на ГРС считается штатной), придется с помощью дросселя 1 в два раза (в соответствии с соотношением (17)) уменьшить давление газа P_B .

Но тогда значительно понизится значение параметра π и, как следствие, более, чем в два раза, исходя из графика на рис. 7, уменьшится величина вихревого эффекта ΔT_x . При необходимости дальнейшего снижения V_B температурная эффективность ВТ практически сведётся к эффективности процесса дросселирования. Приведенный пример показывает, что в этом случае (большой диапазон изменения производительности ВТ при постоянном давлении на входе) термодинамически выгоднее изменять не давление газа перед ВТ, а площадь проходного сечения соплового ввода, когда варьирование расхода газа через ВТ происходит при $\pi = \text{const}$. Следующий подраздел посвящен рассмотрению такого варианта подхода к регулированию производительности ВТ.

Исходя из анализа литературы, можно выделить три способа изменения производительности ВТ: *первый* — многосопловой ввод с изменяемой площадью вводных сопел, *второй* — плавное изменение ширины прямоугольного односоплового ввода, *третий* — плавное варьирование высоты прямоугольного сопла. Одна из пионерных конструкций регулируемого многосоплового ввода представлена в классической моно-

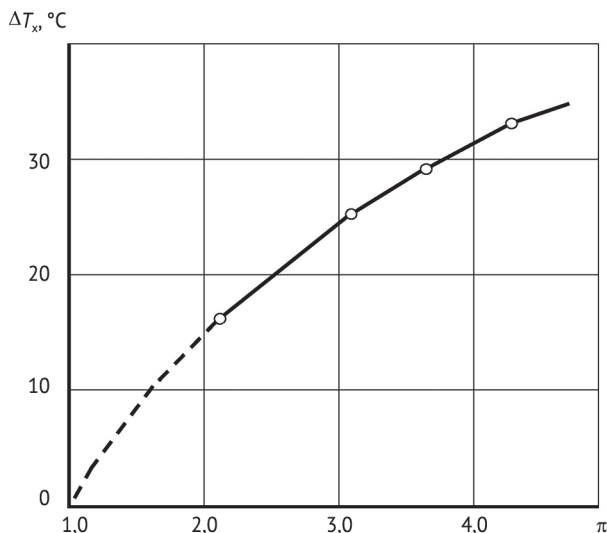


Рис. 7. Зависимость эффекта охлаждения ΔT_x от отношения давлений π при работе вихревой трубе на природном газе при доле холодного потока $\mu = 0,7$ [11]

графии А.П. Меркулова [4] при описании экспериментальной установки по исследованию структуры вихря (рис. 8). Трехсопловой ввод создавался сухарями 2, плотно зажатыми между корпусом вихревой трубы 1 и плоскостью диафрагмы. Они могли поворачиваться вокруг неподвижных осей за счет шестеренчатой пары при снятии «зажатости». После соответствующей корректировки высоты прямоугольных сопел «зажатость» восстанавливалась. Такая конструкция позволяла плавно, но только дискретно, регулировать высоту сопловых вводов с помощью внешнего привода. Однако такое устройство затруднительно применять при непрерывном регулировании расходных характеристик на промышленных ВТ. Из-за неизбежных зазоров между сухарями и боковыми поверхностями корпуса и диафрагмы будут возникать радиальные перетечки высоконапорного газа в ВК, что должно приводить не только к ухудшению процесса стратификации, но и к невозможности получить вихревой эффект при предельно малом расходе газа.

Значительным шагом вперед в совершенствовании многосоплового регулируемого ввода можно считать конструкцию патента [23]. Данная конструкция, судя по данным сайта «Конструкторское бюро ЧКЗ-ЮГСОН», используется в промышленных ВТ. Однако в публикациях отсутствует информация об эффективности и надёжности работы ВТ с таким механизмом регулирования.

Удачной, в части приспособленности, регулируемой ВТ к эксплуатации в промышленных условиях можно считать запатентованное за рубежом механическое устройство, описанное в [9]. Здесь сопла самопроизвольно закрываются или открываются подпружиненными стержнями в зависимости от изменения пара-

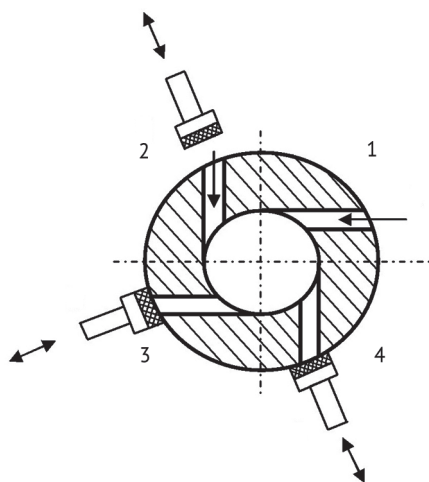


Рис. 9. Принципиальная схема регулирования производительности вихревого подогревателя:
1, 2, 3 и 4 – номера сопловых вводов

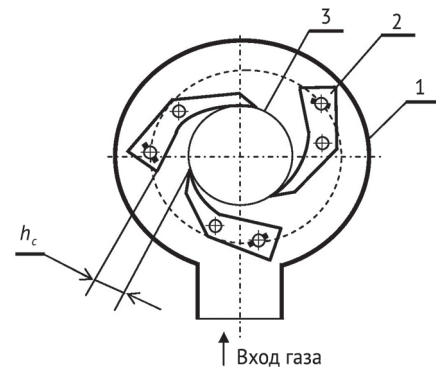


Рис. 8. Конструкция регулируемой трехсопловой вихревой трубы [4]:
1 – корпус; 2 – сухарик; 3 – вихревая камера

метров газа на входе в ВТ (рис. 9). Подпружиненные стержни имеют на рабочих поверхностях уплотняющие элементы, которые обеспечивают герметичность закрытия сопел. Это уязвимые элементы конструкции, особенно при работе аппарата в промышленных условиях (твёрдые и жидкие включения в газе).

По описанному принципу регулирования многосоплового ввода создан и принят к эксплуатации вихревой подогреватель воздуха, который поступает на вентиляцию компенсирующего костюма пилота [3]. В зависимости от высоты полета самолета меняется давление отбора из струйного компрессора воздуха и температура на входе в ВТ. Управление процессом «открытие-закрытие» сопел осуществляется механически с помощью исполнительных устройств в виде вакуумированных стальных сильфонов с пружинными нагрузочными устройствами.

Имеется пример использования ВТ с дискретным регулированием производительности. Схема опытно-промышленной ВУ низкотемпературной сепарации природного газа [24] с дискретно регулируемой ТВТ представлена на рис. 10. Помимо ТВТ в состав

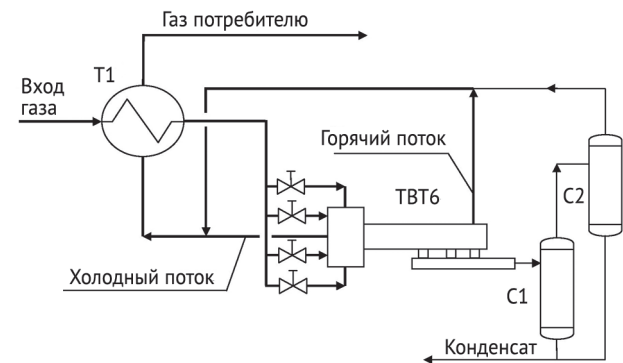


Рис. 10. Схема опытно-промышленной установки с дискретно регулируемой трехпоточной вихревой трубой [24]

ВУ входили рекуперативный теплообменник Т1 и сепараторы С1, С2 для фазового разделения третьего (газожидкостного) потока. Особенность данной схемы в том, что холодный и горячий потоки смешиваются до входа газа в теплообменник. Регулирование производительности ТВТ обеспечивалось в диапазоне (10–100)% с помощью четырехсоплового ввода, но в отличие от варианта в [3] не механическим путем, а соответствующей системой АСУТП. Судя по имеющейся информации, подобного рода вихревые установки не нашли применения в промышленности.

В литературе также опубликован ряд конструктивных вариантов регулируемых сопловых вводов ВТ с плавным изменением геометрии. При этом предложены различные устройства, для варьирования как ширины, так и высоты прямоугольного соплового канала. Первоначально рассмотрим вариант с изменением ширины сопла, который может быть применен как на ДВД, так и на ТВТ.

Одна из конструкций такого метода регулирования была разработана для промышленной ТВТ, предназначенной для работы на установке НТС Карачаганакского месторождения (Казахстан) [25]. Регулируемая ТВТ представляла собой вертикально расположенный цилиндрический аппарат 3, имеющий вихревую камеру с устройством для перемещения подвижной диафрагмы 1 (рис. 11).

В трубе отвода холодного потока расположен шток 2, соединённый с одной стороны с диафрагмой, с другой — с мембранным исполнительным механизмом (МИМ). Для плавного изменения расхода природного газа, поступающего в вихревую трубу, система АСУТП автоматически увеличивает (или уменьшает) площадь проходного сечения соплового ввода за счёт перемещения подвижной диафрагмы.

На этом рисунке приведены сечения двух вариантов исполнения подвижной диафрагмы: вариант 1 выполнен в виде спирального ввода, вариант 2 — в виде более простого тангенциального ввода. По температурной эффективности предпочтительнее вариант 1. Однако в изготовлении проще вариант 2. Он

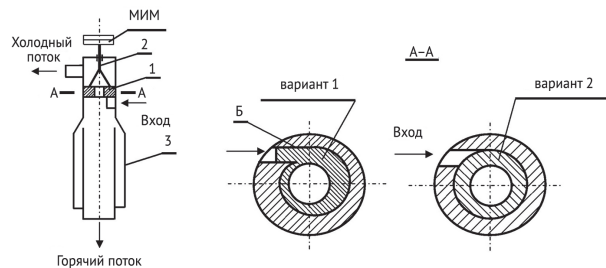


Рис. 11. Исполнение сопловых вводов с подвижной диафрагмой

более надежен и при эксплуатации, поэтому и был принят к реализации. Резюмируя данный метода регулирования производительности ВТ (за счет ширины соплового ввода), следует подчеркнуть громоздкость этого метода, связанного не только с непростым конструктивным исполнением, но и с необходимостью применения МИМа с большим перестановочным усилием для дополнительной компенсации неуравновешенного избыточного давления газа, постоянно действующего на диафрагму со стороны ВК.

Рассмотрим *третий вариант* регулирования производительности ВТ, связанный с плавным варьированием высоты прямоугольного соплового ввода. Одна из первых конструкций ВТ по такому методу регулирования была предложена автором патента [26] для многосолового тангенциального ввода. Она представляла собой два коаксиально расположенных цилиндра, поворачивающихся друг относительно друга и имеющих тангенциальные сопловые прорези (рис. 12).

Недостатки такого способа регулирования производительности ВТ очевидны: сложность исполнения приводного механизма подвижного цилиндра, возможность применения только тангенциального (менее эффективного) соплового ввода и значительные газодинамические потери при уменьшении нагрузки по газу. Эти потери связаны с дополнительным сопротивлением высокоскоростной струе (возмущенное течение газа) на появившемся уступе внутреннего цилиндра.

Более удачную конструкцию регулируемой ВТ предложили авторы [27]. Она содержит спиральный сопловой ввод прямоугольного сечения и рабочий орган регулирования в виде упругой пластины 2, закрепленной с двух концов на профиле соплового ввода 3 (рис. 13). Прогибаясь под действием штока 1, пластина может изменять высоту прямоугольного сопла. Газодинамически это более совершенная конструкция по сравнению с решением в [26], но она также имеет свои минусы, например недостаточную надежность регулирующего элемента. В принципе этот вариант можно использовать в промышленно-

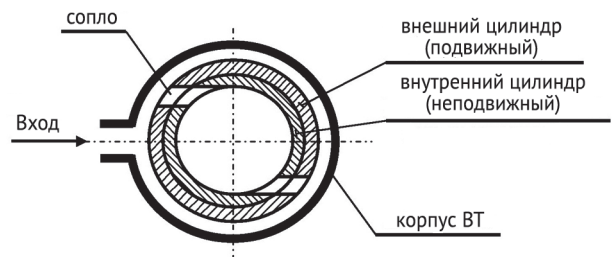


Рис. 12. Принципиальная схема конструкции регулирования производительности ВТ с коаксиальными цилиндрами [26]

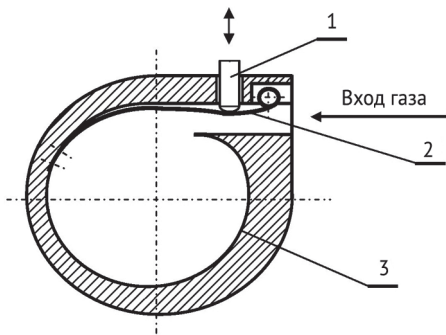


Рис. 13. Конструкция регулируемого соплового ввода с упругой пластиной [41]:
1 – шток; 2 – упругая пластина; 3 – спиральный сопловой ввод

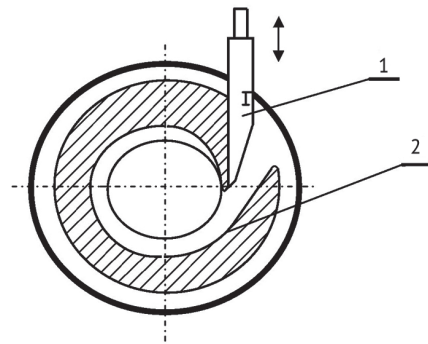


Рис. 14. Схема регулируемого соплового ввода [29]:
1 – регулирующий элемент (клин); 2 – спиральный сопловой ввод

сти, если пластину 2 заменить более надёжным регулирующим элементом.

Такое техническое решение было найдено авторами патента [28]. Здесь вместо упругой пластины имеется клинообразный элемент 1 (рис. 14), который приводится в движение мембранным исполнительным механизмом (МИМ). Тем самым обеспечивается плавное изменение площади соплового ввода 2 — с максимального значения вплоть до его полного закрытия.

Следует отметить, что все промышленные вихревые установки, анализируемые в данном обзоре, имеют в своем составе двух- и трехпоточные вихревые трубы с механизмом регулирования площади сопла (сопл) по способу [28]. Впервые метод регулирования ДВТ по способу [28] (рис. 14) был испытан в 1993 г. в системе ОАО «Оренбурггазпром» на городской ГРС в составе демонстрационной холодильной установки [29, 30].

Схема установки представлена на рис. 15. Природный газ высокого давления поступает в регулиру-

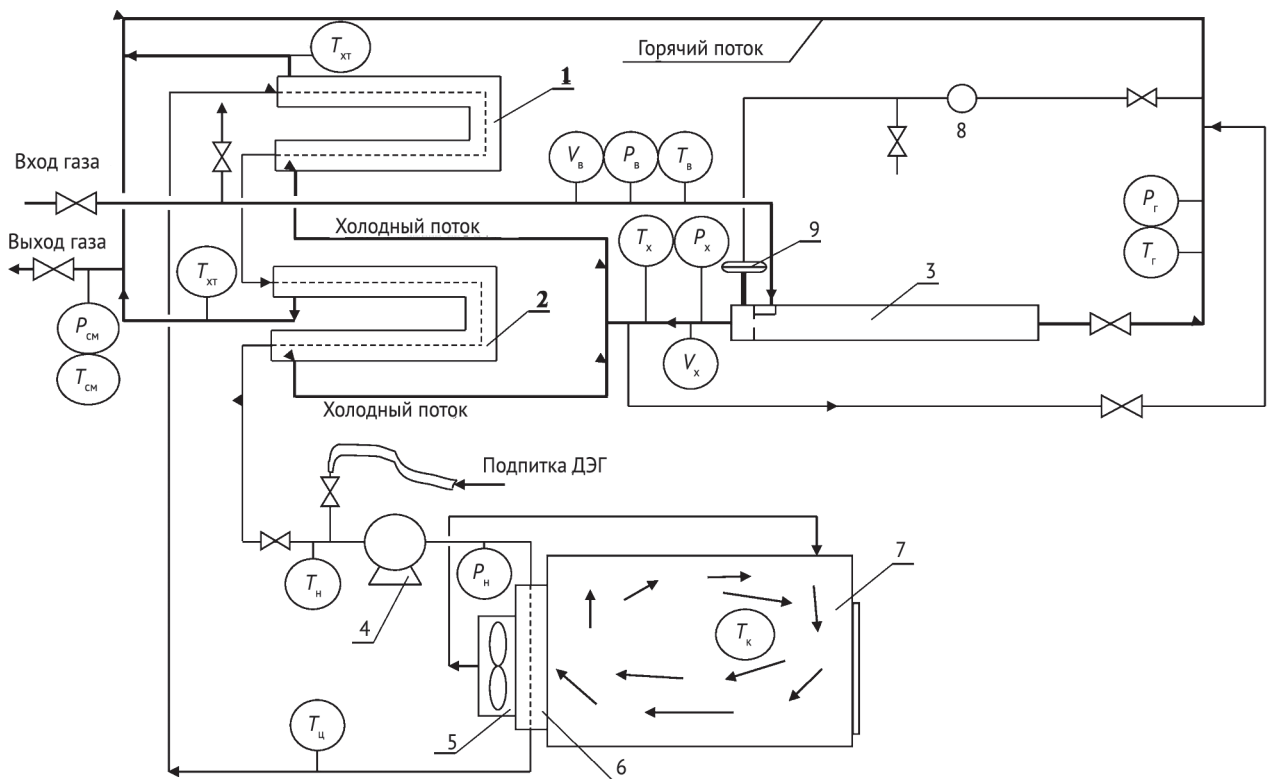


Рис. 15. Технологическая схема холодильной демонстрационной установки на ГРС:
1, 2 – теплообменники; 3 – вихревая труба; 4 – насос ДЭГ; 5 – вентилятор; 6 – воздухоохладитель; 7 – холодильная камера; 8 – редуктор; 9 – мембранный исполнительный механизм

ему ДВТ поз. 3 (внутренний диаметр 143 мм, производительность до 52 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$), где происходят его расширение, закрутка и разделение на холодный и горячий потоки. Холодный поток проходит теплообменники 1 и 2 типа «труба в трубе», охлаждая поступающий в них водный раствор диэтиленгликоля (ДЭГ). Горячий поток ВТ смешивается с газом холодного потока на выходе из теплообменников. Суммарный (смешанный) поток поступает в коллектор низкого давления ГРС. Охлажденный раствор ДЭГ направляется на вход насоса 4 и далее в воздухоохладитель 6. Охладив воздух, циркулирующий в холодильной камере 7, хладагент возвращается в теплообменники 1, 2.

На рис. 16 приведена фотография ДВТ в период пуска-наладки. Перемещение регулирующего клина обеспечивалось МИМ с помощью задаваемого давления природного газа над мембраной.

Следует отметить, что при конструировании первого регулируемого соплового ввода ДВТ высказывались опасения, что введение регулирующего элемента непосредственно в закручивающее устройство может уменьшить температурную эффективность вихревого аппарата по сравнению со «стационарной» конструкцией. Однако этого не произошло. Более того, по температурной эффективности головная ДВТ превзошла все вихревые терморазделители с фиксированной геометрией сопел, опробованные к тому времени на углеводородных смесях (природный газ и ПНГ). Адиабатный к.п.д. регулируемой ДВТ приблизился к уровню лучших ВТ, эксплуатируемых на воздухе [4]. При этом в диапазоне 100–50% номинальной производительности перепад температуры на холодном потоке

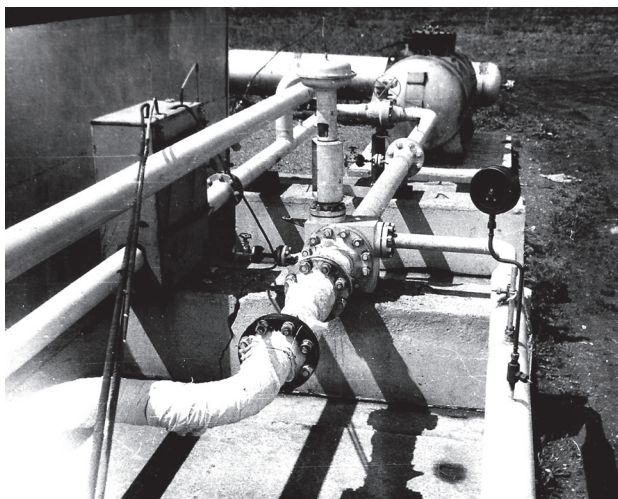


Рис. 16. Общий вид ДВТ на ГРС г. Оренбурга (трубопровод холодного потока теплоизолирован)

регулируемой ДВТ имел небольшие отклонения от прямой, особенно при оптимальном $\mu = 0,7$ (рис. 17). Дальнейшее понижение расхода газа до 30% от номинального приводило к снижению температурной эффективности всего на 15%. Этот показатель вполне устроил эксплуатационщиков.

Перемещение регулирующей задвижки в ДВТ хотя и обеспечивалось с помощью МИМа, но, по сути, проходило в ручном режиме, так как давление природного газа над мембраной регулировалось управляемым редуктором. В дальнейшем наличие МИМ (или электропривода) позволило перевести промышленные ВТ на автоматическое управление.

Представляют интерес результаты длительной эксплуатации ДВТ. Суммарно было наработано более 16 тыс. ч в диапазоне производительности от 9,0 до 50,6 тыс. $\text{нм}^3/\text{ч}$. Температура холодного потока составляла при этом -22 – -45 °С. Важно отметить, что падение температурной эффективности за весь период опытной эксплуатации ДВТ (три года) не зафиксировано. Это говорит о высокой надежности регулируемой вихревой трубы как генератора холода.

Успешные испытания головной регулируемой ДВТ на ГРС дали старт для реализации регулируемых ВТ различной модификации в разнообразных технологических схемах нефтедобывающей и химической промышленности [31, 32].

(Продолжение следует)

Обозначения:

b_c – ширина сопла, м, мм

C_p – удельная теплоёмкость при $P = \text{const}$, кДж/кг-град, ккал/кг-град

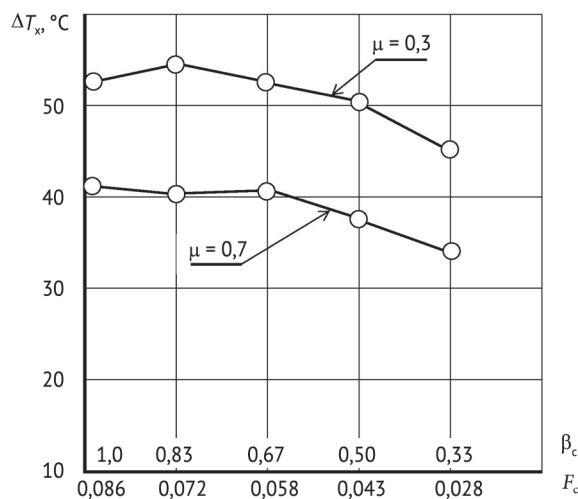


Рис. 17. Зависимость эффекта охлаждения ΔT_x от степени открытия сопла β_c (F_c) при $\pi_{cp} = 5,4$

$D_{тр}$ – внутренний диаметр вихревой трубы, м
 d_d – диаметр диафрагмы, м
 $\bar{d}_d = d_d / D_{др}$ – относительный диаметр отверстия диафрагмы, б/р
 F_c – площадь проходного сечения соплового ввода, м²
 $F_{тр}$ – площадь сечения вихревой камеры, м²
 $\bar{F}_c = F_c / F_{тр}$ – относительная площадь соплового ввода, б/р
 G – весовой расход газа, кг/ч
 g – ускорение свободного падения, м/с²
 h_c – высота сопла, м
 i – удельная энтальпия газа, кДж/кг, ккал/кг
 k – показатель адиабаты, б/р
 $L_{вк}$ – длина вихревой камеры, м
 $L_{тр}$ – длина вихревой трубы, м
 $\bar{L}_{тр} = L_{тр} / D_{тр}$ – относительная длина вихревой камеры, б/р
 $L_{конд}$ – количество конденсата, л/ч
 n – показатель политропы, б/р
 P – избыточное давление газа (абсолютное оговаривается), МПа
 $Q_{конд}$ – теплота конденсации компонентов, кДж/кг, ккал/кг
 $Q_{потр}$ – потребная холодопроизводительность, кДж/ч; ккал/ч
 $Q_{охл}$ – количество тепла, отведенного с вихревой камеры, кДж/ч, ккал/ч
 Q_x – холодопроизводительность вихревой трубы, кДж/ч, ккал/ч
 $q_{охл}$ – удельный тепловой поток, отведенный от вихревой камеры ВТ, кДж/кг, ккал/кг
 q_x – удельная холодопроизводительность ВТ, °С
 q_T – удельная теплопроизводительность ВТ, °С
 R – газовая постоянная, кДж/кг · град, ккал/кг · град
 r – текущий радиус вихревой камеры, м
 s – удельная энтропия газа, кДж/кг·град, ккал/кг·град
 T – температура торможения газа, °С, К
 T_o – температура окружающей среды, °С, К
 T_p – температура точки росы, °С
 ΔT_x – эффект охлаждения газа в вихревой трубе, °С
 $\Delta T_x^{вихр}$ – «чистый» эффект Ранка–Хилша, °С
 ΔT_r – эффект нагрева газа в вихревой трубе, °С
 ΔT_s – эффект охлаждения газа при изоэнтропном расширении, °С
 $\Delta T_{др}$ – эффект Джоуля–Томпсона, °С
 $\Delta T_{нед}$ – недорекуперация на тёплом конце теплообменника, °С
 $\Delta T_{пот}$ – параметр, учитывающий холодопотери в окружающей среду, °С
 ΔT_t – охлаждение высоконапорного газа в теплообменнике, °С
 V – объёмный расход газа, м³/ч, м³/сут
 $V_{отн} = V \cdot 100 / V_{max}$ – относительный расход газа, %
 Z – коэффициент сжимаемости газа, б/р

β_c – степень открытия сопла, б/р
 α_c – коэффициент истечения газа из сопла, б/р
 $\alpha_{др}$ – коэффициент дросселирования, °С/МПа
 γ – удельный вес газа, кг/м³
 π – отношение давлений (степень расширения) газа, б/р
 μ – доля холодного потока, б/р
 $\eta_{ад}$ – адиабатный к.п.д., б/р
 η_T – температурный к.п.д., б/р
 Θ – приведенный показатель эффективности, %
 ϕ – степень очистки (выделения) компонентов, %

Индексы:

в – вход в вихревую трубу
вихр – «чисто» вихревой эффект Ранка–Хилша
г – горячий поток
др – дросселирование
конд – конденсат
ном – номинальный параметр
о – окружающая среда
ов – охлаждающая вода
р – расчётное
см – смешанный поток
с – сопло
ср – усреднённое значение параметра
ст – статический параметр
т – теплообменник
хт – холодный поток после теплообменника
у – вход в вихревую установку
угл – углеводороды
х – холодный поток
экс – эксергетический параметр
max – максимальное значение параметра
min – минимальное значение параметра

Аббревиатуры:

ВТ – вихревая труба
ВУ – вихревая установка
ГСУ – газосепарационная установка
ГПЭС – газопоршневая электростанция
ГРС – газораспределительная станция
ГРП – газораспределительная подстанция
ДВТ – двухпоточная вихревая труба
ДЭГ – диэтиленгликоль
КВС – когерентные вихревые структуры
МИМ – мембранный исполнительный механизм
НВТ – неадиабатная вихревая труба
НТС – низкотемпературная сепарация
ПОГ – пульсационные охладители газа
р.у. – рабочие условия
ТВТ – трёхпоточная вихревая труба
ТДА – турбодетандерные агрегаты
КВС – когерентные вихревые структуры

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ranque G.J.* Experiences sur la détente giratoire avec productions simultanees d'un echappement d'air chaud et d'air froid // *Journal de Physique et la Radium*. — 1933. — vol. 7. — N 4. — P. 112.
2. *Hilsch R.* Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozess // *Zeitschrift fur Naturforschung*. 1946. — Jan. — S. 203–208.
3. *Чижиков Ю.В.* Развитие методов расчета и промышленное использование вихревого эффекта // Дис. ... докт. техн. наук. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 1999. — 291 с.
4. *Меркулов А.П.* Вихревой эффект и его применение в технике // М.: Машиностроение. — 1969. — 183 с.
5. *Мухутдинов Р.Х.* Эффективность внедрения вихревых аппаратов (применительно к нефтехимическим производствам) / Р.Я. Амиров, Л.Э. Альмеев, М.М. Ханнанов // Уфа. — 2001. — 341 с.
6. *Пирилишвили Ш.А.* Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения / Ш.А. Пирилишвили, В.М. Поляев, М.Н. Сергеев // М.: УНПЦ «Энергомаш». — 2000. — 414 с.
7. *Мартынов А.В.* Что такое вихревая труба? / А.В. Мартынов, В.М. Бродянский // М.: Энергия. — 1976. — 153 с.
8. *Жидков М.А.* Термодинамическая эффективность промышленной вихревой трубы / М.А. Жидков, В.П. Овчинников, Г.А. Комарова // Газовая промышленность. — 1997. — № 12. — С. 54–56.
9. *Суслов А.Д.* Вихревые аппараты. / А.Д. Суслов, С.В. Иванов, А.В. Мурашкин, Ю.В. Чижиков // М.: Машиностроение. — 1985. — 252 с.
10. *Сафонов В.А.* Влияние параметров сопла на характеристики конического вихревого холодильника. // Республиканский межведомственный сборник «Самолетостроение и техника воздушного флота». — 1970. — № 22. — С. 55–60.
11. *Жидков М.А.* Низкотемпературная очистка газов с применением вихревого эффекта // Дис. ... канд. техн. наук. — М.: ГИАП. — 1982. — 231 с.
12. *Бобровников Г.Н.* Современное состояние и возможности применения вихревых труб в холодильной технике и в системах кондиционирования / Г.Н. Бобровников, А.А. Поляков, А.П. Лепявко, Н.И. Ильина // М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ. — 1978. — 53 с.
13. *Торочешников Н.С.* Исследование эффекта температурного разделения воздуха в прямоточной вихревой трубе / Н.С. Торочешников, И.Л. Лейтес, В.М. Бродянский // Журнал технической физики. — 1958. — Т. XXVIII. — № 6. — С. 1231–1236.
14. *Макаров В.В.* Исследование вихревой трубы с дополнительным потоком // Дис. ... канд. техн. наук. — Омск. — ОГТУ. — 1996. — 196 с.
15. *Хаум А.В.* Исследование эффекта энергоразделения с целью улучшения характеристик вихревой трубы // Дис. ... канд. техн. наук. — Екатеринбург. — УФУ. — 2012. — 196 с.
16. *Otten E.H.* Vortex tube // *Engineering*. — Aug. — 1958. — № 4821.
17. *Азаров А.И.* Вихревые трубы в промышленности // С-Петербург. — Лема. — 2010. — 170 с.
18. *Ильский О.Г.* Применение вихревых трубок на объектах магистральных газопроводов / О.Г. Ильский, А.С. Юдин // Газовая промышленность. — 1968. — № 5. — С. 16–19.
19. *Плотников В.М.* Регуляторы давления газа / В.М. Плотников, В.А. Подрешетников, А.П. Дроздов, В.Я. Гончаров // Л.: Недра. — 1982. — С. 108–111.
20. Каталог технологического оборудования действующих газораспределительных станций магистральных газопроводов с рекомендациями по реконструкции и модернизации // РАО «Газпром». — М. — 1994. — 238 с.
21. *Jens Mischner, Rainer Siebert und Michael Heit.* Gasfachliche Forschung am FB Versorgungstechnik der FH Erfurt // *Gas Erdgas*. — 2001. — № 6. — S. 417–423.
22. *Jens Mischner, Volker Köckritz und Kathrin Kadner.* Bewertung von Verfahren zur Gasdruckminderung // *Gas Erdgas*. — 2001. — Nr. 10. — S. 706–717.
23. *Ловцов А.В.* Вихревая труба // Патент РФ № 2370710. — 2009.
24. *Hajdik B., Lorey M., Steinle J., Thomas K.* Vortex tube can increase liquid hydrocarbon recovery at plant inlet // *Oil & Gas Journal*. — 1997, Sept., p. 76–83.
25. *Жидков М.А.* Применение трёхпоточной вихревой трубы в установках низкотемпературной сепарации природного газа на газодобывающих промыслах / М.А. Жидков, Г.А. Комарова, И.Л. Лейтес, Н.В. Махонина, В.В. Николаев, Н.Т. Климов, Исхаков Р.М. // Оренбургский межотраслевой территориальный Центр научно-технической информации и пропаганды. — Информационный листок НТД. — № 20–26. — 1990.
26. *Fekete L.A.* Process and device for the separation of gases // Patent 3296807 (USA). — 1967.
27. *Жидков М.А.* Вихревая труба / М.А. Жидков, И.Л. Лейтес. // Авт. свид. СССР, М. Кл. 2 F 25B 9/02 — № 515000; Заяв. 08.01.75; Опубл. 25.05.76, Бюл. № 19.
28. *Жидков М.А.* Вихревой аппарат / М.А. Жидков, Г.А. Комарова // Пат. № 2035990 РФ, С1 6B01 J 8/16. Заяв. 07.12.93; Опубл. 27.05.95, Бюл. № 15.
29. *Бетлинский В.Ю.* Двухпоточные регулируемые вихревые трубы в промышленных установках очистки и осушки газов / М.А. Жидков, В.П. Овчинников // Газовая промышленность, 2008, № 1, с. 72–75.
30. *Бетлинский В.Ю.* Экспериментальное исследование термодинамической эффективности регулируемой трубы



на природном газе / М.А. Жидков, В.П. Овчинников, Д.А. Жидков // Нефтегазовые технологии, 2008, № 2, с. 2–6.

31. Жидков М.А. Варианты технологических схем эксплуатируемых и разрабатываемых вихревых установок для подготовки углеводородных газов к транспорту /

М.А. Жидков, А.П. Гусев, А.П. Рябов, Д.А. Жидков // Нефть. Газ. Новации, 2011, № 10, с. 12–19.

32. Бетлинский В.Ю., Жидков М.А., Овчинников В.П. Двухпоточные регулируемые вихревые трубы в промышленных установках очистки и осушки газов // Газовая промышленность — 2008. — № 1. — С. 72–75.

REFERENCES

- Ranque G.J. Experiences sur la détente giratoire avec productions simultanees d'un echappement d'air chaud et d'air froid. *Journal de Physique et la Radium*. 1933. Vol. 7. N 4. P. 112.
- Hilsch R. Die Expansion von Gasen im Zentrifugalfeld als Kälteprozess. *Zeitschrift fur Naturforschung*. 1946. Jan. S. 203–208.
- Chizhikov Y.V. *Razvitiye metodov rascheta i promyshlennoye ispol'zovaniye vikhrevogo effekta. Dokt. Diss.* [Development of methods of calculation and the industrial use of vortex effect. Doct. Diss.]. Moscow, MGTU im . N.E. Bauman Publ., 1999. 291 p. (in Russian)
- Merkulov A.P. *Vikhrevoy effekt i yego primeneniye v tekhnike* [Vortex effect and its applications in engineering]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1969. 183 p. (in Russian)
- Mukhutdinov R.H. *Effektivnost' vnedreniya vikhrevykh apparatov (primenitel'no k neftekhimicheskim proizvodstvam)* [The effectiveness of the implementation of the vortex devices (with reference to the petrochemical production)]. Ufa. 2001. 341 p. (in Russian)
- Piralishvili S.A. *Vikhrevoy effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskiye resheniya* [Vortex effect. The experiment, theory, technical solutions]. Moscow, UNPTS «Energomash» Publ., 2000. 414 p. (in Russian)
- Martynov A.V. *Chto takoye vikhrevaya truba?* [What is a vortex tube?]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 153 p. (in Russian)
- Zhidkov M.A. The thermodynamic efficiency of industrial vortex tube. *Gas industry*. 1997, I. 12, pp. 54–56. (in Russian)
- Suslov A.D. *Vikhrevyye apparaty* [Vortex devices]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1985. 252 p. (in Russian)
- Safonov V.A. Influence of parameters on the characteristics of the conical nozzle of the vortex refrigerator. National Interdepartmental collection of «Aircraft Equipment and Air Fleet». 1970, I. 22, pp. 55–60. (in Russian)
- Zhidkov M.A. *Nizkotemperaturnaya ochildka gazov s primeneniye vikhrevogo effekta. Kand. Diss.* [Low-temperature gas cleaning using a vortex effect. Cand. Diss.]. Moscow, GIAP Publ., 1982. 231 p. (in Russian)
- Bobrovnikov G.N. *Sovremennoye sostoyaniye i vozmozhnosti primeneniya vikhrevykh trub v kholodil'noy tekhnike i v sistemakh konditsionirovaniya* [Current state and possible applications of vortex tubes in refrigeration and air conditioning systems]. Moscow, TSINTIKHIMNEFT-EMASH Publ., 1978. 53 p. (in Russian)
- Torocheshnikov N.S. Research the effect of temperature of air separation in vortex tube ramjet [Study the effect of temperature of air separation in vortex tube ramjet]. *Technical Physics* [Technical Physics]. 1958, V. XXVIII, I. 6, pp. 1231–1236. (in Russian)
- Makarov V.V. *Issledovaniye vikhrevoy truby s dopolnitel'nyim potokom. Kand. Diss.* [A study of the vortex tube with an additional stream. Cand. Diss.]. Omsk, OGTU Publ., 1996. 196 p. (in Russian)
- Khait A.V. *Issledovaniye effekta energo razdeleniya s tsel'yu uluchsheniya kharakteristik vikhrevoy truby. Kand. Diss.* [Study the effect of energy separation in order to improve the characteristics of the vortex tube. Cand. Diss.]. Yekaterinburg, UFU Publ., 2012. 196 p. (in Russian)
- Otten E.H. Vortex tube. *Engineering*. Aug. 1958. № 4821.
- Azarov A.I. *Vikhrevyye truby v promyshlennosti* [Vortex tube in the industry]. St. Peterburg, Lema Publ., 2010. 170 p. (in Russian)
- Ilsky A.G. Application of vortex tubes on the objects of the main gas pipelines. *Gas industrialness*. 1968. № 5. pp. 16–19. (in Russian)
- Plotnikov V.M. Gas pressure regulators. Leningrad, Nedra Publ., 1982, pp. 108–111. (in Russian)
- Katalog tekhnologicheskogo oborudovaniya deystvuyushchikh gazoraspredelitel'nykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodov s rekomendatsiyami po rekonstruktsii i modernizatsii* [Catalog of technological equipment of existing gas distribution stations of main gas pipelines with recommendations on reconstruction and modernization]. RAO «Gazprom». Moscow, 1994. 238 p. (in Russian)
- Jens Mischner, Rainer Siebert und Michael Heit. Gasfachliche Forschung am FB Versorgungstechnik der FH Erfurt. *Gas Erdgas*. 2001. № 6. S. 417–423. (in Russian)
- Jens Mischner, Volker Köckritz und Kathrin Kadner. Bewertung von Verfahren zur Gasdruckminderung. *Gas Erdgas*. 2001. Nr. 10. S. 706–717. (in Russian)
- Lovtsov A.V. *Vikhrevaya truba* [The vortex tube]. *Patent RF № 2370710. — 2009* [Patent of the Russian Federation № 2370710. — 2009]. (in Russian)
- Hajdik B., Lorey M., Steinle J., Thomas K. Vortex tube can increase liquid hydrocarbon recovery at plant inlet. *Oil & Gas Journal*. 1997, Sept., pp. 76–83.
- Zhidkov M.A. Application of third-flow vortex tube in the low-temperature separation plants of natural gas at the gas producing fields. Orenburg interbranch territorial centers of scientific and technical information and propaganda. Fact sheet specification. № 20–26. 1990. (in Russian)

26. Fekete L.A. Process and device for the separation of gases. Patent 3296807 (USA). — 1967.
27. Zhidkov M.A. *Vikhrevaya truba* [The vortex tube]. Avt. svid. SSSR, M. Kl. 2 F 25B 9/02 — № 515000; Zayav. 08.01.75; Opubl. 25.05.76, Byul. № 19. (in Russian)
28. Zhidkov M.A. *Vikhrevoy apparat* [Swirl unit]. Pat. № 2035990 RF, S1 6V01 J 8/16. Zayav. 07.12.93; Opubl. 27.05.95, Byul. № 15. (in Russian)
29. Betlinsky V.Y. Adjustable dual-flow vortex tubes in industrial installations cleaning and drying gas. *Gas Industry*, 2008, № 1, pp. 72–75. (in Russian)
30. Betlinsky V.Y. Experimental study of the thermodynamic efficiency of the regulated tube natural gas. *Oil and Gas Technologies*, 2008, № 2, pp. 2–6. (in Russian)
31. Zhidkov M.A. Variants of technological schemes of vortex exploited and developed systems for the preparation of hydrocarbon gases to transport. *Oil. Gas. Innovations*, 2011, № 10, pp. 12–19. (in Russian)
32. Betlinsky V.Y., Zhidkov M.A., Ovchinnikov V.P. Adjustable dual-flow vortex tubes in industrial installations cleaning and drying gas. *Gas industry*. 2008. I. 1, pp. 72–75. (in Russian)

Vortex Technology of Gases Stratification for Solving Ecological Issues of Oil, Gas and Chemical Industries

D.A. Zhidkov, Postgraduate Student, Bauman Moscow State Technical University

V.A. Devisilov, Ph.D., Docent, Deputy Head of Department, Bauman Moscow State Technical University

One of the important tasks of the Russian economy and ecology is development and realization of energy-saving technologies, allowing the most efficient use of both primary and secondary energy resources. In oil, gas and chemical industries, there are processes, in which the potential energy of pressure of hydrocarbon or waste gases is either lost, either recycled with minimum efficiency. The energy lost should be used for low-temperature purification of waste and prepared gases, thus reducing environmental pollution. One way to solve this problem is to develop a vortex technology based on the Rank-Hilsch effect. By efficiency this method of purification exceeds standard throttling systems. This review presents an analysis of both theoretical and technological aspects of research of the vortex effect. Different constructions of vortex tube are considered along with the one of the important conditions of its operation and realization in the industry - regulation of the incoming flow. It is shown that the realization of the regenerative scheme with vortex tubes will improve ecological and economic indicators of the core technology. A critical review of existing theories of the Ranque-Hilsch effect is provided. The article reviews the prospects of development of shock-wave mechanism that allows to explain the excessive cooling capacity of triple-flow vortex tubes used for associated petroleum gas treatment.

Keywords: vortex effect, ecology, gas purification, double-flow vortex tube, triple-flow vortex tube, vortex unit, cooling capacity, enthalpic balance, natural gas, associated gas, waste gas, air, condensate, shock-wave mechanism.

Регистрация студентов, аспирантов и научно-педагогических сотрудников для прохождения стажировок в зарубежных странах

В новом 2016 г. Минобрнауки России приглашает студентов, аспирантов и научно-педагогических сотрудников для прохождения учебных стажировок в зарубежных странах. В соответствии с Соглашениями о международном сотрудничестве в области науки и образования между Министерством образования и науки Российской Федерации с Данией, Китаем, Словакией,

Венгрией, Таиландом, Норвегией, Гонконгом, Румынией, Чехией и другими странами, российским соискателям предоставляется возможность бесплатного обучения. Они могут попасть на языковые и учебные стажировки, а также пройти повышение квалификации.

Более подробная информация размещена на сайте: <http://im.interphysica.su>.

Международная выставка-форум «Экотех»

26–29 апреля 2016 года впервые в России на одной из самых современных площадок — МВЦ «Крокус Экспо» — Минприроды России проведет международную выставку-форум «ЭКОТЕХ». «ЭКОТЕХ» — практический инструмент презентации зарубежных и российских инновационных экологических разработок и эффективное дискуссионное пространство. Современные

мировые реалии обуславливают развитие новых экономических моделей, предусматривающих внедрение «зеленых» технологий. Они стали основой политики многих государств. С более подробной информацией о выставке, ее программе и о том, как стать участником, можно ознакомиться на сайте <http://www.ecotech-expo.ru/ecotech>.