

Я.А. Коркодинов

I.A. Korkodinov

Пермский национальный исследовательский политехнический университет
Perm National Research Polytechnic University

О.Г. Хурматуллин

O.G. Khurmatullin

«Урал-инструмент-Пумори», г. Пермь
Ural-Tool-Pumori Ltd, Perm

ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА РАНКА – ХИЛЬША

THE APPLICATION OF RANQUE – HILSH EFFECT

Рассматривается история открытия и применения эффекта Ранка – Хильша в России и за рубежом. Описывается сущность эффекта и основные понятия, необходимые для его изучения, простейшие случаи вихревого движения. Дан обзор основных конструкций вихревых трубок. Рассматривается возможность и особенности применения вихревых трубок для сепарации газов. Делаются выводы и обозначаются дальнейшие направления исследования.

Ключевые слова: эффект Ранка – Хильша, вихревая трубка, охлаждение и нагревание газа, конденсация жидкости, сепарация природного и попутного газа.

The history and application of Ranque – Hilsh effect in Russia and abroad are considered. The main conception of effect is presented. The two main cases of vortex motion are considered. The main design features are reviewed. The probability and special features of vortex tube application for gas separation are considered. The conclusions are made. Further investigations are described.

Keywords: Ranque – Hilsh effect, vortex tube, gas cooling and heating, fluid condensation, natural and associated gas separation.

В 1931 г. Ж. Ранком при измерении температуры в промышленном циклоне был открыт вихревой эффект, заключающийся в снижении температуры в центральных слоях закрученного потока газа и повышении температуры на периферии потока. В то время вихревой эффект не был принят французским академическим сообществом, и исследования не имели продолжения. Только в 1946 г. Р. Хильш опубликовал результаты своих экспериментов, а также предложил конструкцию вихревой трубки. Его работы получили известность по всему миру, и ученые из других стран также начали работу по исследованию эффекта. К настоящему времени опубликованы ты-

сячи работ по применению эффекта в самых разных областях человеческой деятельности, от охлаждения кабин поездов до создания холодильных установок в развивающихся сообществах африканского континента.

В Советском Союзе первые исследования эффекта Ранка начали проводиться В.С. Мартыновским и В.П. Алексеевым [1–4] в Одесском технологическом институте в 1952 г. Активное развитие теории, разработку методов расчета и конструирование вихревых труб проводил А.П. Меркулов [5]. По его инициативе было проведено шесть всесоюзных конференций. В его трудах рассматривается возможность применения вихревых труб для осушения сжатых газов. Широко известна книга А.Д. Суслова [6], в которой рассматриваются вихревые аппараты, применяемые для охлаждения и нагревания газов, сепарации двухфазных сред, разделения газовых смесей и вакуумирования.

А.Ф. Гуцол сделал обзор [7], в котором обобщил большинство существующих на тот момент российских теорий. Также он выдвинул свою теорию, согласно которой разделение газа в вихревой трубе происходит с помощью микрообъемов с разной кинетической энергией и скоростью. Более быстрый газ будет двигаться на периферию, тогда как более медленный будет скапливаться в центре. Широко известны в мире работы А.И. Леонтьева [8], в которых он предлагает свое объяснение процессов, происходящих в вихревой трубе. В работе [9] рассматриваются возможности применения вихревых трубок в сушильных процессах.

Следует отметить также зарубежные работы. Обширное исследование по применению вихревых трубок для сепарации газов было проведено в Oak Ridge National Laboratory [10]. В работе [11] делается предположение о возникновении обратного цикла Карно внутри вихревой трубки. Обширный обзор литературы, попытка модифицировать теорию из [11], а также ряд новых экспериментальных данных были получены в работе [12].

Сущность эффекта Ранка – Хильша. Рассмотрим подробнее устройство вихревой трубки (рис. 1). Вихревая трубка состоит из следующих частей: одно или несколько входных отверстий, вихревая камера, выходы для холодного и горячего газа и непосредственно сама трубка [12]. Сжатый газ под высоким давлением (6 бар) проникает в вихревую камеру. После этого газ закручивается и движется по направлению к выходу горячего газа. Часть газа охлаждается, расширяется и концентрируется в центре трубки. Другая часть газа приобретает более высокую скорость, нагревается и остается на периферии. При достижении контрольного клапана горячая составляющая выходит через выход горячего газа. Холодная составляющая сталкивается с контрольным клапаном и начинает двигаться в обратном направлении. Часть ее потом выходит через выход холодного газа, а часть движется обратно к контрольному клапану. Несмотря на кажущуюся простоту эффекта, причины его воз-

никновения не выяснены до сих пор. В настоящее время имеются тысячи самых разных его объяснений, но одного, которое можно было бы назвать единственно верным, не существует. Несмотря на то что были написаны подробные монографии по применению данного эффекта на практике [5, 6], в действительности данный эффект используется достаточно мало. Чтобы попытаться понять сущность эффекта, рассмотрим основные понятия гидродинамики вихревых потоков и характеристики вихревых труб [7].

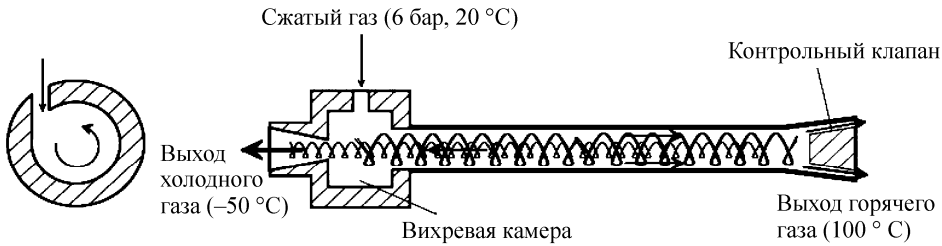


Рис. 1. Устройство вихревой трубки

Основные понятия. Для того чтобы оценить эффективность той или иной трубки, разными авторами вводятся некоторые параметры. Рассмотрим наиболее известные из них.

Процессы в вихревых трубках с точки зрения термодинамики. Будем рассматривать следующие пять основных параметров системы: давление p , температуру T , плотность ρ , скорость V и энтальпийный поток \hat{H} (рис. 2). Обозначим данные параметры на входе – p_{in} , T_{in} , ρ_{in} , V_{in} , \hat{H}_{in} , на выходе горячего потока – p_h , T_h , ρ_h , V_h , \hat{H}_h , на выходе холодного потока – p_c , T_c , ρ_c , V_c , \hat{H}_c .

Для постоянного потока условие сохранения массы жидкости в вихревой трубке можно записать как

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_h + \dot{m}_c,$$

где \dot{m}_c – поток массы жидкости на выходе холодного потока, запишем его как $\varepsilon \dot{m}_{in}$; \dot{m}_h – поток массы жидкости на выходе горячего потока, запишем его как $(1-\varepsilon)\dot{m}_{in}$; \dot{m}_{in} – масса жидкости на входе; ε – доля холодного потока, одна из основных и наиболее известных характеристик вихревых трубок, находится по формуле

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_{in}}.$$

В качестве показателей эффективности вихревых трубок часто берут следующие разницы температур: $\Delta T_h = T_h - T_{in}$ – разница между температурой горячего потока и температурой на входе, $\Delta T_c = T_c - T_{in}$ – разница между температурой холодного потока и температурой на входе, $\Delta T_{hc} = T_h - T_c$ – разница между температурой горячего и холодного потоков.

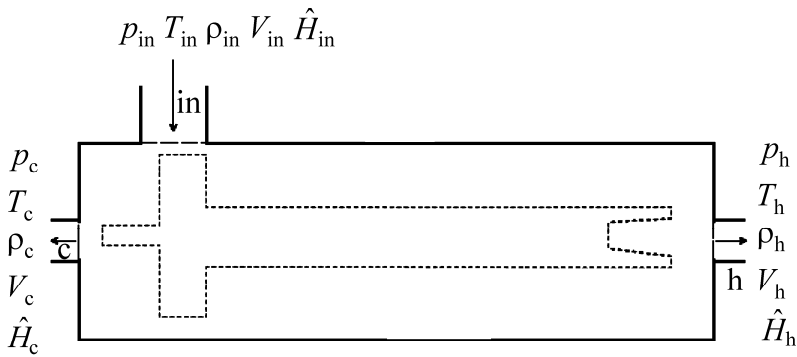


Рис. 2. Параметры трубки

Простейшие случаи вихревого движения. Рассмотрим два простейших случая движения жидкости или газа. В первом простейшем случае вихревого движения жидкости или газа весь объем вращается как твердое тело вокруг некоторой оси с постоянной угловой скоростью ω . Тогда скорость движения v элемента жидкости и расстояние r до оси вращения можно связать по формуле

$$\omega = \frac{v}{r}.$$

Такое движение принято называть квазитвердым движением или вынужденным вихрем.

Достаточно широко применяется понятие завихренности, или циркуляции скорости,

$$\Gamma = \oint \vec{v} \cdot d\vec{l}. \quad (1)$$

Вторым простейшим случаем движения является свободный, или потенциальный, вихрь, который описывается формулой

$$vr = \Gamma = \text{const.}$$

При этом величина циркуляции, вычисляемая по формуле (1), остается постоянной для любого замкнутого контура, охватывающего ось вращения и равна нулю для любого другого контура.

Чтобы описать плоские течения, промежуточные между свободным и вынужденным вихрем, используют вихрь Рэнкина, в котором распределение скорости описывается формулой

$$v = \frac{C}{r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right) \right],$$

где C и r_0 – константы, определяющие интенсивность вихря и радиальную координату, условно разделяющую свободный и вынужденный вихри.

Иногда используют более простое описание, которое также называют вихрем Рэнкина,

$$vr^n = \text{const}, \quad n = -1 \quad (0 < r < r^*), \quad n \leq 1 \quad (r^* \leq r).$$

Также рассмотрим причины возникновения обратных течений. При движении вращающегося газа вдоль трубы его окружная скорость падает за счет торможения о стенки, и радиальный перепад давлений уменьшается. Если поступательная составляющая скорости газа невелика, то возникает отрицательный градиент давлений, который порождает обратное течение.

Основные конструкции вихревых трубок. Классическая конструкция вихревой трубки изображена на рис. 1. Данную трубку будем называть противоточной, так как холодный поток жидкости выходит с противоположного конца. Также отметим цилиндрическую форму всей трубки. При изменении конструкции вихревой трубки обычно варьируются выход холодного потока, входные отверстия, контрольный клапан и форма самой трубки. Почти в каждом новом исследовании предлагается своя конструкция вихревой трубки. Рассмотрим далее наиболее распространенные конструкции вихревых трубок, а также особенности их применения [5, 12].

Прямоточная вихревая трубка. Отверстие для холодного потока жидкости не всегда может располагаться с противоположного конца. Еще Хильш рассматривал возможную конструкцию прямоточной вихревой трубки (рис. 3). Большинство авторов признало подобную конструкцию вихревой трубки менее эффективной [13–15]. Тем не менее применение прямоточных вихревых трубок оправдано в случае, когда важна компактность оборудования.

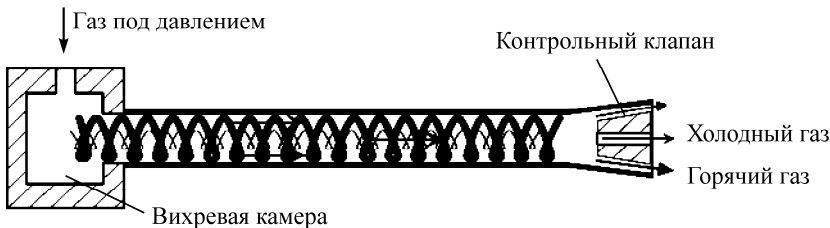


Рис. 3. Прямоточная вихревая трубка

Коническая вихревая трубка. На эффективность вихревой трубки значительное влияние оказывает ее геометрия. Одним из важных параметров является отношение длины трубки к ее диаметру. Соответственно, чем больше это отношение, тем эффективнее вихревая трубка. Чтобы сократить длину трубки, сохранив ее эффективность, применяют конические вихревые трубки (рис. 4). Для охлаждения широко используют конические трубки, в которые подается еще один поток газа с температурой как у входного потока, но при меньшем давлении. В этом случае охлаждающий эффект трубок возрастает.

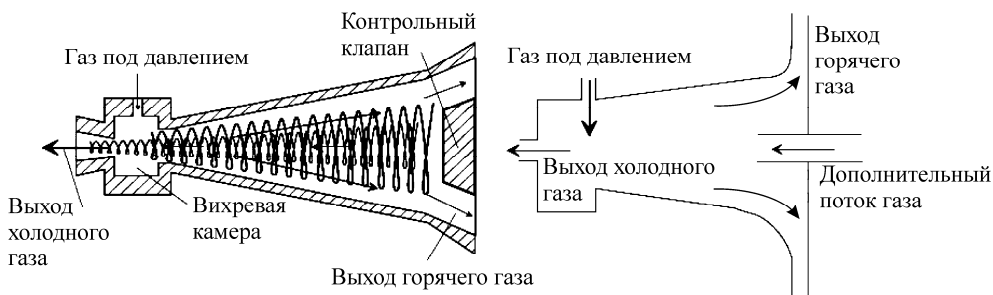


Рис. 4. Коническая вихревая трубка

В наши дни повсеместно распространено применение вихревых трубок как холодильников (см. www.vortexair.biz, www.airtx.com, www.newmantools.com).

Для их применения в данном качестве необходим лишь поток сжатого газа. На протяжении многих лет разными авторами предлагаются усовершенствования вихревых трубок, работающих как холодильные установки. Далее рассмотрим некоторые из них.

Охлаждаемые вихревые трубки. Самые горячие слои газа находятся на периферии вихревой трубки. Их высокая температура, а также высокая скорость турбулентного вихря обеспечивают большие значения коэффициента теплообмена с окружающей средой.

Если искусственно охлаждать периферию вихревых трубок, то их КПД значительно возрастет. Существует два вида охлаждаемых вихревых труб (рис. 5): с охлаждающей рубашкой и с охлаждающим жидкостным вихрем [5]. Наружная поверхность первого вида охлаждается протекающей по рубашке жид-

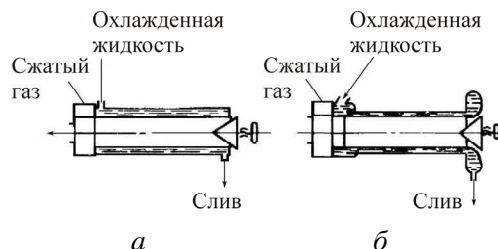


Рис. 5. Охлаждаемые вихревые трубки: а – с охлаждающей рубашкой; б – с охлаждающим жидкостным вихрем

костью. У второго есть кольцевая щель внутри трубы, через которую охлаждающая жидкость вводится с определенной скоростью закрутки и создает быстровращающийся цилиндрический слой, который движется к горячему концу и отводится через кольцевую щель около дросселя.

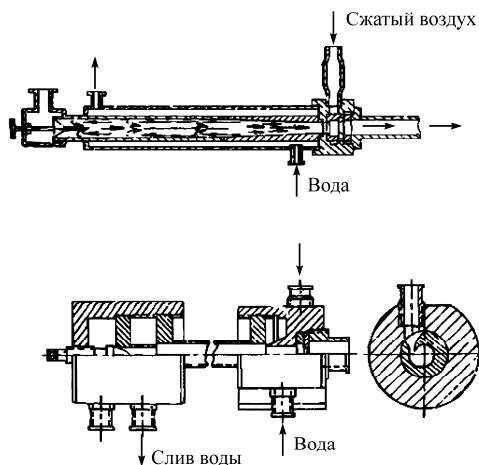


Рис. 6. Примеры конструкций охлаждаемых вихревых трубок

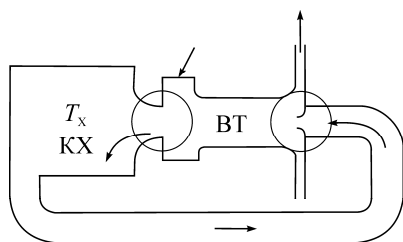


Рис. 7. Конструкция замкнутой вихревой трубки: T_x – температура в холодильной камере; КХ – холодильная камера; ВТ – вихревая трубка

лообмен (за счет многократной циркуляции) в самой трубке. К сожалению, данная схема не смогла создать интенсивную прокачку холодного воздуха, а введение холодильной камеры себя не оправдало.

Также возможны схемы, где горячий поток поступает в резервуар с жидкостью, где охлаждается до температуры входного потока, после чего вместе с входным потоком опять поступает в вихревую трубку.

Разница температуры охлаждающей жидкости в $\pm 10^\circ\text{C}$ практически не влияет на эффект охлаждения. С другой стороны, регулировать температуру холодного потока вихревой трубы можно с помощью изменения расхода охлаждающей жидкости. На рис. 6 представлены примеры конструкций охлаждаемых вихревых трубок.

Вихревые трубки с многократной циркуляцией. Вихревые трубки обладают достаточно низким КПД (20–40 %). Для холодильных установок КПД можно повысить, используя энергию горячего потока, который обычно просто выбрасывается во внешнюю среду.

Можно подобрать такую конструкцию вихревой трубки, в которой поток не разделяется (рис. 7) [5]. В данной конструкции происходит многократная циркуляция потока. С каждым циклом температура охлажденной части потока становится еще ниже. В данном случае имеют место два основных процесса: вакуумирование холодного потока за счет раскрутки горячего потока и регенеративный теплообмен (за счет многократной циркуляции) в самой трубке.

Вихревые трубки с искусственным торможением вихревого потока. Как было показано в работах [5, 6], искусственное торможение вихревого потока на нагретом конце камеры разделения создает благоприятные условия для формирования приосевого потока, направленного к диафрагме. Это позволяет уменьшить длину камеры разделения и увеличить КПД. Данная конструкция имеет следующий вид (рис. 8). На нагретом конце камеры разделения 1 установлена крестовина 8. Крестовина формирует заторможенный поток, который в свою очередь формирует дополнительный приосевой поток. Этот поток охлаждается за счет взаимодействия с периферийным потоком. Эффективность данной конструкции была подтверждена экспериментально.

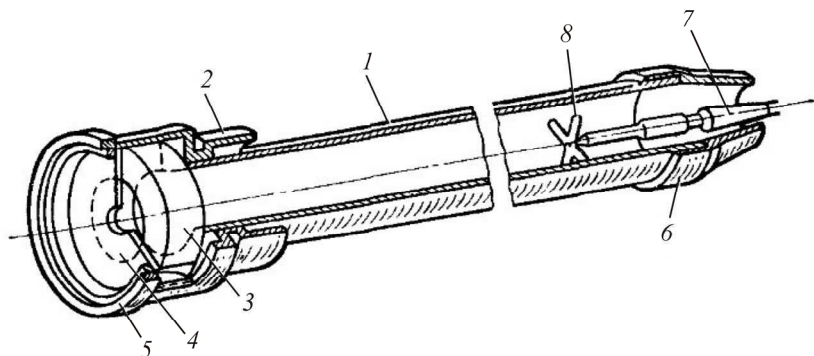


Рис. 8. Вихревая трубка с торможением потока: 1 – камера разделения; 2 – корпус; 3 – улитка; 4 – диафрагма; 5 – гайка; 6 – сопло; 7 – регулировочная игла; 8 – крестовина

Коническая камера разделения. Трубка Парулейкара. Эффективность вихревой трубки повышается при конической форме камеры разделения, так как создаются более подходящие условия для формирования приосевого потока. Благодаря этому удается уменьшить длину камеры в 1,5–2 раза по сравнению с цилиндрической. Обычно начальный участок камеры разделения выполняют в виде конуса, а конечный – в виде цилиндра. В конце камеры разделения устанавливают развихритель. Примером такой конструкции может быть трубка Парулейкара (рис. 9). Камера разделения данной трубки имеет три участка: первый, у сопла – конический, второй – цилиндрический и третий – конический. Отличительной чертой данной трубы является наличие третьего участка с выраженной конусностью. В данном случае нагретый конец камеры разделения сопрягается с развихрителем, который выполнен в виде канала прямоугольного сечения, а не крестовины. Патрубок вывода горячего потока выполнен под прямым углом к оси камеры разделения. Следует отметить, что суммарный эффект всей этой видоизмененной конструкции получается такой же, как у вихревой трубки с крестовиной.

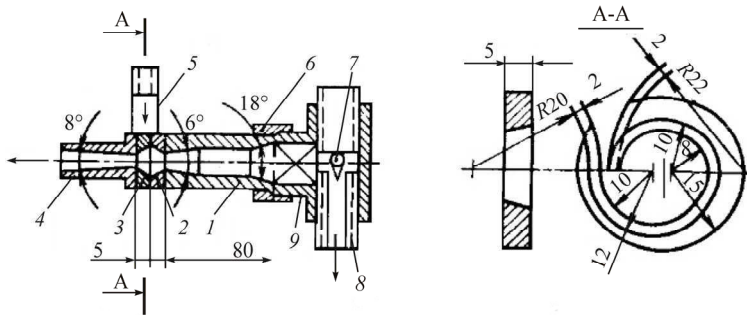


Рис. 9. Вихревая трубка Парулейкара: 1 – камера разделения; 2 – конфузор; 3 – сопло; 4 – диффузор; 5 – патрубок ввода сжатого воздуха, 6 – соединительная гайка; 7 – игольчатый вентиль; 8 – патрубок вывода потока; 9 – развихритель

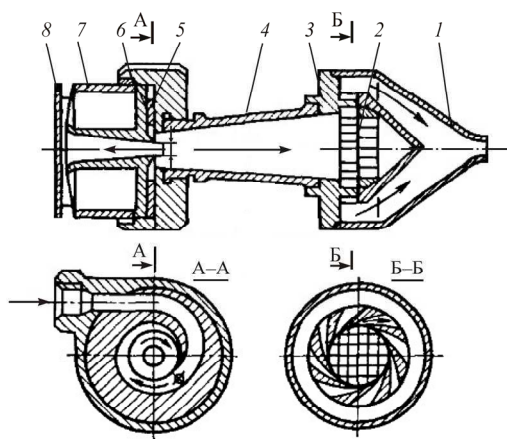


Рис. 10. Вихревая трубка Метенина: 1 – патрубок нагретого потока; 2 – сетка; 3 – лопаточный диффузор; 4 – вихревая камера; 5 – сопло; 6 – диафрагма; 7 – патрубок охлажденного потока; 8 – диск

Вихревая трубка Метенина.

Еще одним вариантом конструкции является вихревая трубка Метенина (рис. 10). На нагретом конце камеры разделения данной трубки установлены сетка 2 и лопаточный диффузор 3. Эти элементы позволяют сократить длину камеры разделения. В данной конструкции сетка является развихрителем. Она затормаживает внутренние части потока, передавшие значительную часть своей энергии внешним слоям. Эти внутренние части и формируют внутренний поток с пониженной температурой.

Использование вихревых трубок для сепарации газов.

Применение вихревых трубок для сепарации газов открыло большие перспективы для исследователей в самых разных областях. Например, природный и попутный нефтяной газы, добытые из скважины, не могут использоваться без предварительной обработки из-за большого содержания примесей. Так, в добываемом газе всегда присутствует влага в парообразном состоянии. При охлаждении газа или повышении давления влага конденсируется и может образовать свободную воду, лед или гидраты. Это может привести к коррозии металла, накоплению жидкости в линейной части газопровода, закупорке гидратными пробками и остановке подачи газа потребителям. Мировым лидером в применении вихревых трубок для осушки природного газа является немецкая

компания RWE Energy. Конструкция такой трубы (рис. 11) мало отличается от классической (см. рис. 1) [16]. При прохождении вдоль трубы часть газа охлаждается. Для некоторых компонентов, таких как пар, наступает температура конденсации. Также действует центробежная сила, которая прижимает конденсат и другие тяжелые компоненты к стенке трубы. Далее компоненты стекают через специальные отверстия в специальный резервуар для конденсата. Поток горячего газа через специальную щель проходит по специальной трубе и соединяется с холодным потоком.

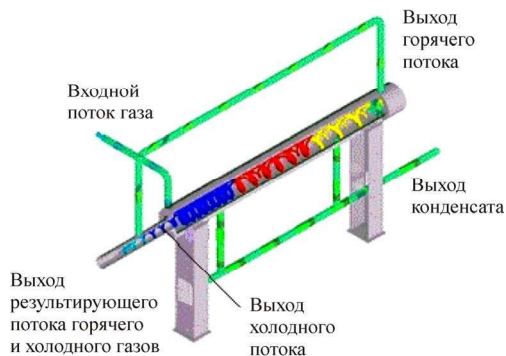


Рис. 11. Конструкция вихревой трубы для сепарации газов (<http://www.filtan.de>)

Конструкция изображена схематично на рис. 12. Газ из трубопровода проходит в подогреватель, после чего происходит впрыскивание в газ гликоля. Впрыскивание и предварительный нагрев нужны для предотвращения образования гидратов и гидрокарбонатов. После этого газ подается через контрольный клапан в вихревую трубу, где происходит его осушка. Далее горячий поток газа, в котором содержится гликоль, приходит в холодный сепаратор, где за счет охлаждения происходит регенерация гликоля, а также горячий поток соединяется с конденсатом. Но теперь смешивания газа и конденсата не происходит, так как конденсат находится в жидком состоянии.

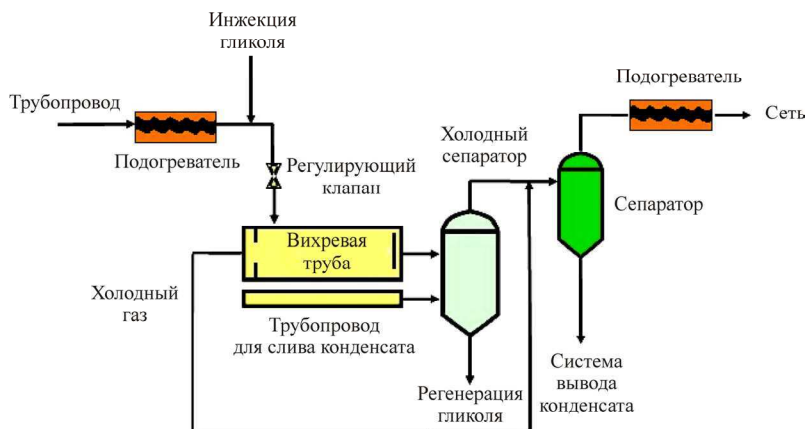


Рис. 12. Схема установки для сепарации газов [16]

Затем гликоль по трубопроводу идет к началу установки, где происходит его впрыскивание. Далее горячий поток с конденсатом соединяется с холодным потоком и идет в сепаратор, где происходит слив конденсата. Поток газа идет в подогреватель, после чего поступает дальше в сеть.

Следует отметить, что на практике используются две вихревые трубы. Они функционируют по отдельности или параллельно в зависимости от давления газа и величины потока. В каждую трубу на входе газ поступает из двух труб. Чтобы разбить входной поток газа и контролировать его поступление в вихревую трубу, используются два контрольных клапана. Входные отверстия труб сконструированы так, чтобы максимально увеличить скорость потока.

Данная установка была разработана немецкой фирмой в 2000 г. и внедрена в производство в 2006 г. Установка привлекает своей простотой, высокой надежностью и долговечностью. На рис. 13 изображена вихревая труба после пяти лет успешного функционирования. На ней не обнаружено никаких видимых следов механического износа. По сравнению с традиционными установками для осушки газа применение гликоля было снижено на 90 %, а также существенно сокращено негативное влияние на окружающую среду.



Рис. 13. Вихревая труба после пяти лет испытаний

В России применение вихревых труб для сепарации газов пока развито недостаточно. Компания RWE Energy применяет самую простую конструкцию вихревой трубы и только для сепарации природного газа. Возможно усовершенствование вихревой трубы и установки в целом, а также разработка подобной установки для сепарации попутного нефтяного газа. Также возможно создание численной математической модели установки, которая бы позволила моделировать основные процессы, происходящие в вихревой трубе, оценивать ее эффективность и нормальное функционирование и усовершенствовать конструкцию.

Список литературы

1. Мартыновский В.С., Мельцер Л.З. О холодильном эффекте вихревой трубы // Холодильная техника. – 1952. – № 4.
2. Мартыновский В.С. Алексеев В.П. Вихревой эффект охлаждения и его применение // Холодильная техника. – 1953. – № 3.
3. Мартыновский В.С., Алексеев В.П. Термодинамический анализ эффекта вихревого температурного разделения газов и паров // Теплоэнергетика. – 1955. – № 11.
4. Мартыновский В.С., Алексеев В.П. Эффект вихревого температурного распределения перегретых паров и опытная проверка гипотезы Хильша – Фультона // Известия АН СССР. – 1956. – № 1.
5. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике – М.: Машиностроение, 1969. – 185 с.
6. Вихревые аппараты / А.Д. Суслов, С.В. Иванов, А.В. Мурашкин, Ю.В. Чижиков. – М.: Машиностроение, 1985. – 256 с.
7. Гуцол А.Ф. Эффект Ранка // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167, № 6. – С. 665–687.
8. Leont'ev A.I. Gasdynamic methods of temperature stratification // Fluid dynamics. – 2002. – Vol. 37, № 4. – P. 512–536.
9. Коновалов В.И., Орлов А.Ю., Гагапова Н.Ц. Сушка и другие технологические процессы с вихревой трубкой Ранка – Хильша: возможности и экспериментальная техника // Вестник ТГТУ. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 803–825.
10. Baker P.S., Rathcamp W.R. Investigations on the Ranque – Hilsh (vortex) tube / Oak Ridge National Laboratory. – Oak Ridge, 1954. – 38 p.
11. Ahlborn B.K., Gordon J.M. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle // Journal of applied physics. – 2000. – Vol. 88, № 6. – P. 3645–3653.
12. Gao C. Experimental study on the Ranque – Hilsh vortex tube // PhD Study. – 2005. – 151 p.
13. Fulton C.D. Comments on the vortex tube // J. ASRE Refrigerating Engng, – 1950. – Vol. 58.
14. Cockerill T. Ranque – Hilsh vortex tube // Master thesis, University of Cambridge, 1995.
15. Linderstorm-Lang C.U. Studies on transport of mass and energy in the vortex tube // The significance of the secondary flow and its interaction with the tangential velocity distribution. Riso report, Denmark, 1971. – 30 p.
16. Gronner J. Successful experience with vortex tube technology at the epe cavity storage of RWE Energy // 23rd World Gas Conference. – Amsterdam, 2006. – 11 p.

Получено 1.11.2012

Коркодинов Ярослав Александрович – аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: svarogjk1989@rambler.ru).

Хурматуллин Олег Гаднанович – соискатель ПНИПУ, «Урал-инструмент-Пумори» (614107, г. Пермь, ул. Инженерная, 14, e-mail: oleg@uipumori.ru).

Korkodinov Iaroslav Aleksandrovich – Graduate Student, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: svarogjk1989@rambler.ru).

Khurmatullin Oleg Gadnanovich – Applicant, Ural-Tool-Pumori Ltd (614107, Perm, Inzhenernaya st., 14, e-mail: oleg@uipumori.ru).