

*Нагимов Ильгам Рустямович,  
магистрант,*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет,*

*Российская Федерация, г. Уфа*

*Научный руководитель: Трофимов Андрей Юрьевич,*

*доцент, кандидат технических наук, преподаватель кафедры ПТЭ,*

*Уфимский государственный нефтяной технический университет,*

*Российская Федерация, г. Уфа*

## **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ВИХРЕВЫХ ТРУБ ПРИ ПОДГОТОВКЕ СЫРОГО ГАЗА НА ГАЗОКОНДЕНСАТНЫХ ПРОМЫСЛАХ**

*Аннотация:* В статье представлен обзор технологических возможностей применения вихревых труб в системах подготовки сырого газа на газоконденсатных промыслах. Рассмотрены физические основы эффекта температурного разделения газового потока, специфика работы с многокомпонентными углеводородными средами, а также систематизированы основные способы применения вихревых труб: низкотемпературная сепарация газа, стабилизация газового конденсата, интенсификация процессов поддержания пластового давления и улавливание паров легких углеводородов. На основе анализа литературных данных определены преимущества и ограничения вихревых труб в сравнении с традиционным оборудованием. Показано, что вихревые трубы обладают высоким потенциалом для повышения энергоэффективности, экологической безопасности и технологической гибкости процессов подготовки сырого газа, особенно в условиях удаленных и труднодоступных объектов.

**Ключевые слова:** вихревая труба, труба Ранка-Хилша, газоконденсатный промысел, сырой газ, низкотемпературная сепарация, стабилизация конденсата, поддержание пластового давления, улавливание паров, энергоэффективность.

***Nagimov Il'gam Rustyamovich,***  
***master's Student,***

***Ufa State Petroleum Technological University,***  
***Russian Federation, Ufa***

***Research supervisor: Trofimov Andrey Yuryevich,***  
***lecturer at the Industrial Heat Power Engineering Department,***  
***Associate Professor, Candidate of Technical Sciences,***  
***Ufa State Petroleum Technological University,***  
***Russian Federation***

## **TECHNOLOGICAL CAPABILITIES OF VORTEX TUBES IN RAW GAS TREATMENT AT GAS CONDENSATE FIELDS**

***Abstract:*** *The article presents a review of the technological capabilities of vortex tubes application in raw gas treatment systems at gas condensate fields. The physical basis of the gas flow temperature separation effect, the specifics of operation with multicomponent hydrocarbon media, and the main methods of vortex tubes application are systematized: low-temperature gas separation, gas condensate stabilization, enhancement of reservoir pressure maintenance processes, and light hydrocarbon vapor recovery. Based on the analysis of literature data, the advantages and limitations of vortex tubes in comparison with traditional equipment are determined. It is shown that vortex tubes have high potential for improving energy efficiency, environmental safety, and technological*

*flexibility of raw gas treatment processes, especially in remote and hard-to-reach facilities.*

**Keywords:** *vortex tube, Ranque-Hilsch tube, gas condensate field, raw gas, low-temperature separation, condensate stabilization, reservoir pressure maintenance, vapor recovery, energy efficiency.*

**Введение.** Газоконденсатные месторождения занимают важное место в структуре сырьевой базы нефтегазовой отрасли. Для многих из них характерны сложное геологическое строение, многокомпонентный состав пластового флюида и, что принципиально важно для рассматриваемой темы, высокие пластовые давления. На начальных этапах разработки таких месторождений давление на устье скважин может достигать значительных величин, создавая энергетический ресурс, который традиционно утилизируется через систему дросселирования с потерей потенциальной работы сжатого газа.

Парадокс существующих технологических схем подготовки сырого газа на газоконденсатных промыслах заключается в том, что высокое пластовое давление, являющееся природным энергетическим ресурсом, в процессе дросселирования преобразуется преимущественно в теплоту, которая затем рассеивается в атмосферу через аппараты воздушного охлаждения. При этом для осуществления низкотемпературной сепарации, необходимой для конденсации тяжелых углеводородов и достижения нормативных показателей точки росы, требуется искусственное охлаждение, которое в традиционных схемах обеспечивается либо за счет эффекта Джоуля-Томсона (с ограниченной эффективностью), либо с использованием внешних холодильных машин, потребляющих значительные объемы электроэнергии или топливного газа [1].

Вихревые трубы (трубы Ранка-Хилша, RHVT) представляют собой пассивное устройство, позволяющее преобразовывать потенциальную

энергию сжатого газа непосредственно в эффект охлаждения без использования движущихся частей и внешних хладагентов [2]. Отсутствие движущихся частей, взрывопожаробезопасность, способность работать с многофазными средами и создавать глубокий холод (температурный перепад до 50–70 К) делают это оборудование особенно привлекательным для условий газоконденсатных промыслов, где высокое пластовое давление выступает естественным энергетическим ресурсом для его работы [3].

Целью данной обзорной статьи является систематизация и анализ технологических способов применения вихревых труб в процессах подготовки сырого газа на газоконденсатных промыслах с акцентом на использование высокого энергетического потенциала пластового газа.

### **Физические основы работы вихревой трубы и специфика углеводородных сред. Эффект температурного разделения Ранка-Хилша.**

Вихревая труба представляет собой устройство, в котором сжатый газ, тангенциально вводимый через сопловой аппарат, приобретает интенсивное закрученное движение. В процессе движения по цилиндрической камере происходит самопроизвольное разделение потока на две фракции с различными температурами: периферийный (горячий) поток движется по внутренней стенке трубы, нагревается и отводится через регулируемый дроссель на дальнем конце; осевой (холодный) поток формируется в приосевой зоне, охлаждается и выводится через диафрагму, расположенную вблизи соплового ввода [2, 4]. Температура горячего потока может превышать температуру входного газа на 20–50 К, в то время как температура холодного потока может быть ниже входной на 30–70 К.

Эффект температурного разделения, известный как эффект Ранка-Хилша, обусловлен сложным взаимодействием вязкостных сил, турбулентных пульсаций и перераспределения кинетической энергии между периферийными и осевыми слоями газа. Ключевым параметром, определяющим эффективность разделения, является доля холодного потока

— отношение массового расхода холодного газа к общему расходу на входе, регулируемое положением дроссельного клапана на выходе горячего потока.

Эффект температурного разделения, известный как эффект Ранка-Хилша, обусловлен сложным взаимодействием вязкостных сил, турбулентных пульсаций и перераспределения кинетической энергии между периферийными и осевыми слоями газа. Ключевым параметром, определяющим эффективность разделения, является доля холодного потока — отношение массового расхода холодного газа к общему расходу на входе, регулируемое положением дроссельного клапана на выходе горячего потока [3].

**Специфика работы с сырым газом газоконденсатных месторождений.** Применение вихревых труб для обработки сырого газа газоконденсатных месторождений имеет ряд особенностей по сравнению с работой на идеальных газах или воздухе. Пластовый газ представляет собой многокомпонентную смесь, включающую от метана до тяжелых углеводородов C10+ и выше, а также неуглеводородные компоненты, такие как диоксид углерода, азот и, в ряде случаев, сероводород. При охлаждении в вихревой трубе происходит конденсация тяжелых углеводородов, что может приводить к образованию двухфазного потока внутри аппарата.

Способность вихревых труб работать с двухфазными средами является их важным преимуществом. Образующийся конденсат может выноситься с холодным потоком или осаждаться на стенках холодной камеры. Для эффективного сбора конденсата применяются специальные конструктивные решения: увеличенный диаметр холодной диафрагмы, установка сепарационных элементов на выходе холодного потока, использование трехпоточных конструкций с дополнительным отводом жидкой фазы [3, 5].

**Энергетический потенциал высоконапорных газоконденсатных месторождений.** Для многих газоконденсатных месторождений характерны высокие пластовые давления, достигающие на глубинах залегания

значительных величин. На устье скважин давление может составлять десятки мегапаскалей в зависимости от режима эксплуатации и степени обводненности. Высокое пластовое давление создает значительный энергетический ресурс, который может быть использован для работы вихревых труб. Для эффективного функционирования вихревой трубы необходим перепад давления от 0,5 до 3,0 МПа в зависимости от конструкции и требуемого температурного эффекта. Наличие на промысле сырого газа с высоким начальным давлением позволяет включать вихревые трубы в технологическую цепочку без дополнительных затрат энергии на предварительное компримирование [1].

Кроме того, высокое давление способствует увеличению плотности газа, что при закрутке в сопловом аппарате приводит к возрастанию кинетической энергии потока и, как следствие, повышению эффективности температурного разделения. Для газоконденсатных смесей повышенное давление также сдвигает фазовое равновесие в сторону более полной конденсации тяжелых углеводородов при охлаждении, что усиливает технологический эффект [5].

**Систематизация способов применения вихревых труб при подготовке сырого газа.** Анализ литературных источников позволяет выделить четыре основных способа применения вихревых труб на газоконденсатных промыслах, каждый из которых решает специфические технологические задачи в процессе подготовки сырого газа к транспорту и переработке.

**Низкотемпературная сепарация газа.** Низкотемпературная сепарация (НТС) является базовым методом подготовки сырого газа к магистральному транспорту, обеспечивающим доведение точки росы по углеводородам до нормативных значений. Традиционные схемы НТС основаны на охлаждении газа за счет дросселирования (эффект Джоуля-Томсона) с последующим разделением фаз в сепараторах. Однако данный подход имеет ряд

ограничений: требуется значительный перепад давления, что проблематично на поздних стадиях разработки; степень охлаждения жестко связана с величиной перепада давления и не может регулироваться независимо; эффективность конденсации тяжелых углеводородов ограничена [1].

Применение вихревых труб в схемах НТС позволяет преодолеть указанные ограничения. Сырой газ после первой ступени сепарации направляется в вихревую трубу, где происходит разделение потока на холодный и горячий. Холодный поток (температура до  $-20\dots-40^{\circ}\text{C}$ ) поступает в низкотемпературный сепаратор, где происходит выделение сконденсировавшихся тяжелых углеводородов. Горячий поток (температура выше входной) может быть использован для технологических нужд: подогрева оборудования, регенерации абсорбентов или смешан с холодным потоком после сепарации для повышения температуры товарного газа [3, 6].

Преимущества данного способа включают возможность работы при ограниченных перепадах давления (от 0,5 МПа), независимое регулирование температуры охлаждения путем изменения доли холодного потока, увеличение глубины извлечения конденсата на 15–35% по сравнению с одноступенчатым дросселированием, а также отсутствие внешних хладагентов и движущихся частей [5].

**Стабилизация газового конденсата.** Нестабильный конденсат, выделяемый на сепарационных ступенях в процессе подготовки сырого газа, содержит растворенные легкие фракции (C1–C4), которые создают риски при хранении и транспортировке: повышение давления насыщенных паров, испарение при нагреве, пожаровзрывоопасность. Традиционная стабилизация конденсата осуществляется в ректификационных колоннах с подводом тепла, что требует значительных энергозатрат [1].

Применение вихревых труб для стабилизации конденсата предполагает их использование в качестве источника холода для конденсации легких фракций. Часть стабильного конденсата или осушенного газа используется в

качестве рабочего тела вихревой трубы. Холодный поток вихревой трубы направляется в теплообменник, где охлаждает нестабильный конденсат. При охлаждении конденсата происходит конденсация легких фракций (пропан-бутановая фракция), которые выделяются в отдельном сепараторе и могут быть направлены на дальнейшую переработку или использованы в качестве топливного газа. Горячий поток вихревой трубы может быть использован для подогрева стабильного конденсата перед отгрузкой [3].

Энергетический эффект применения вихревых труб в процессах стабилизации заключается в снижении нагрузки на традиционные холодильные машины и уменьшении затрат на компремирование паров отдувки. Для удаленных промыслов, где отсутствует развитая инфраструктура энергоснабжения, использование вихревых труб для стабилизации конденсата может быть экономически оправданным решением [1].

**Интенсификация процессов поддержания пластового давления.** На газоконденсатных месторождениях, особенно на поздних стадиях разработки, применяется закачка сухого газа в пласт для поддержания пластового давления и подавления ретроградной конденсации (сайклинг-процесс). Эффективность закачки определяется объемом закачиваемого газа, выраженным в массовых единицах, поскольку именно масса нагнетаемого агента определяет степень компенсации отбора.

Применение вихревых труб в системах поддержания пластового давления основано на охлаждении нагнетаемого газа перед подачей в пласт. Часть сухого газа, предназначенного для закачки, направляется в вихревую трубу. Холодный поток вихревой трубы подается в теплообменник, где охлаждает основной поток нагнетаемого газа. Снижение температуры нагнетаемого газа приводит к увеличению его плотности и, следовательно, к возрастанию массового расхода при тех же объемных характеристиках компрессорного оборудования [5].

Дополнительный эффект достигается за счет снижения работы сжатия: охлаждение газа на входе в компрессор уменьшает затраты мощности на компримирование. В ряде исследований показано, что снижение температуры нагнетаемого газа на 20°C позволяет увеличить массу закачиваемого газа на 5–8% при неизменной объемной производительности компрессоров [6]. Особую актуальность данный способ приобретает для месторождений с низкими пластовыми давлениями, где каждый дополнительный килограмм закачиваемого газа критичен для поддержания проектного уровня добычи.

**Улавливание паров легких углеводородов.** На объектах подготовки сырого газа и конденсата (резервуарные парки, наливные эстакады, установки стабилизации) неизбежны потери легких углеводородов с «дыхательными» выбросами. Эти потери составляют от 0,1 до 0,5% от объема хранимого продукта и приводят не только к экономическим потерям, но и к существенной экологической нагрузке.

Применение вихревых труб для улавливания паров основано на конденсации тяжелых углеводородов из парогазовоздушной смеси. Парогазовоздушная смесь из дыхательной линии резервуара направляется в вихревую трубу, где происходит разделение потока. Холодный поток, имеющий температуру ниже точки росы углеводородов, вызывает их конденсацию. Сконденсировавшаяся жидкая фаза отделяется в сепарационном устройстве и возвращается в резервуар или направляется на утилизацию, а очищенный газ выбрасывается в атмосферу с остаточным содержанием углеводородов [2].

Достоинства данного способа включают компактность оборудования, позволяющую размещать его непосредственно на резервуарах; отсутствие движущихся частей и источников искрообразования, что критически важно для взрывопожароопасных объектов; возможность работы в автоматическом режиме без постоянного обслуживания; а также высокую экологическую

эффективность — снижение выбросов углеводородов достигает 80–95%. Для условий Крайнего Севера, где традиционные системы улавливания паров теряют эффективность при низких температурах, вихревые трубы предлагают надежное и энергонезависимое решение.

**Преимущества и ограничения применения вихревых труб при подготовке сырого газа.** Вихревые трубы обладают рядом характеристик, определяющих их привлекательность для применения в процессах подготовки сырого газа на газоконденсатных промыслах. Ключевым преимуществом является отсутствие движущихся частей, что обеспечивает высокую надежность, минимальные затраты на обслуживание и возможность непрерывной работы в течение длительного времени без остановок на ремонт. Отсутствие электрических компонентов и источников искрообразования гарантирует взрывопожаробезопасность, что особенно важно для объектов с высокими классами взрывоопасности. Способность работать с многофазными средами позволяет обрабатывать сырой газ с капельным конденсатом без дополнительной подготовки. Быстрая регулировка режима путем настройки дроссельного клапана горячего потока обеспечивает гибкость управления технологическим процессом. Компактность вихревых труб позволяет размещать их в стесненных условиях существующих промысловых площадок, а энергонезависимость (для работы требуется только перепад давления) делает их особенно ценными для удаленных и труднодоступных объектов, где надежное электроснабжение отсутствует [2, 3, 5].

Наряду с преимуществами, применение вихревых труб сопряжено с рядом ограничений, которые необходимо учитывать при проектировании систем подготовки сырого газа. Для эффективной работы вихревой трубы требуется перепад давления не менее 0,5–1,0 МПа, поэтому на поздних стадиях разработки месторождений, когда пластовое давление снижается, применение вихревых труб может быть ограничено. Эффективность

температурного разделения и конденсации тяжелых углеводородов существенно зависит от содержания  $C_3+$  в исходном сыром газе; для бедных газоконденсатных смесей (содержание  $C_3+$  менее 3–5%) применение вихревых труб может быть экономически неоправданным. При охлаждении влажного газа ниже  $0^\circ\text{C}$  существует риск гидратообразования, что требует предварительной осушки газа или введения ингибиторов гидратообразования. На текущий момент отсутствуют унифицированные типоразмерные ряды вихревых труб, охватывающие весь диапазон промышленных расходов (от сотен до сотен тысяч  $\text{м}^3/\text{ч}$ ), что затрудняет тиражирование решений. Кроме того, по энергетической эффективности преобразования перепада давления в холод вихревые трубы уступают турбодетандерам: КПД вихревых труб составляет 10–30% от теоретического цикла Карно, тогда как для турбодетандеров этот показатель может достигать 70–85%. Однако для малых и средних расходов, а также в условиях, где применение турбодетандеров невозможно по техническим или экономическим причинам, вихревые трубы остаются конкурентоспособными [1, 3, 5].

**Заключение и перспективы.** Проведенный обзор позволяет сделать вывод о том, что вихревые трубы обладают значительным технологическим потенциалом для применения в процессах подготовки сырого газа на газоконденсатных промыслах. Высокое пластовое давление, характерное для многих газоконденсатных месторождений, создает благоприятные условия для эффективной работы этого оборудования без использования дополнительных источников энергии.

Систематизация способов применения вихревых труб выделяет четыре основных направления в подготовке сырого газа: низкотемпературная сепарация газа, обеспечивающая повышение глубины извлечения конденсата и достижение нормативных показателей точки росы при ограниченных перепадах давления; стабилизация газового конденсата, позволяющая

снизить энергозатраты на подготовку стабильного конденсата и уменьшить потери легких фракций; интенсификация процессов поддержания пластового давления, повышающая эффективность закачки сухого газа за счет увеличения его плотности при охлаждении; а также улавливание паров легких углеводородов, обеспечивающее снижение экологической нагрузки и возврат ценных компонентов.

Для широкого промышленного внедрения вихревых труб на газоконденсатных промыслах необходимы: систематизация накопленного опыта эксплуатации на действующих месторождениях с формированием базы данных по эффективности для различных составов сырого газа и конденсата; разработка унифицированных методик выбора геометрических и режимных параметров вихревых труб в зависимости от промысловых условий; создание типоразмерных рядов вихревых труб, охватывающих широкий диапазон расходов; разработка комбинированных технологических схем, интегрирующих вихревые трубы с традиционным оборудованием (теплообменниками, сепараторами, турбодетандерами); а также проведение технико-экономического анализа для различных промысловых условий с целью определения областей наибольшей эффективности.

Перспективными направлениями развития являются использование трехпоточных конструкций вихревых труб для повышения эффективности разделения газоконденсатных смесей, а также создание автономных модульных установок подготовки сырого газа для удаленных и труднодоступных месторождений, где применение традиционных холодильных систем ограничено.

### **Библиографический список:**

1. Зысин В.А., Ходанович Л.С. Энергосбережение в нефтегазовом комплексе. Утилизационные установки на компрессорных станциях. – М.: Недра, 2018. – 312 с.

2. Меркулов А.П. Вихревой эффект и его применение в технике. – Самара: Оптима, 2019. – 284 с.
3. Eiamsa-ard S., Promvong P. Review of Ranque-Hilsch Vortex Tube Applications // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 2928–2947.
4. Hilsch R. The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process // Review of Scientific Instruments. – 1947. – Vol. 18, No. 2. – P. 108–113.
5. Уразов Р.Н., Петров А.М., Семенов И.В. Повышение энергетической эффективности газоперекачивающих агрегатов за счет утилизации тепла // Теплоэнергетика. – 2021. – № 12. – С. 45–53.
6. Степанов К.В., Баранов Д.Л. Особенности проектирования систем теплоснабжения с использованием низкопотенциального тепла в условиях Крайнего Севера // Энергосбережение и водоподготовка. – 2022. – № 4. – С. 28–34.