

УДК 661.741

DOI: 10.17277/voprosy.2025.04.pp.007-019

ТЕРМОСТАТИРОВАНИЕ АДСОРБЕРОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВИХРЕВОЙ ТРУБЫ В СИСТЕМАХ ОЧИСТКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ВЫБРОСОВ

**В. С. Власенко, В. В. Слесаренко, Е. Г. Автомонов,
А. И. Гулевич, С. Д. Горошко**

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, Россия*

Ключевые слова: абсорбция; адсорбция; вихревая труба; рекуперация паров; термостатирование; углеводородные выбросы.

Аннотация: Исследованы технологии термостатирования на основе применения вихревых труб для повышения эффективности процессов очистки парогазовых смесей от углеводородов и предотвращения углеводородных выбросов в атмосферу. Рассмотрены проблемы выбросов летучих органических соединений при сливо-наливных операциях на нефтяных терминалах, где интенсивное испарение углеводородов приводит к загрязнению окружающей среды. Приведены расчеты эффективности применения комбинированной адсорбционно-абсорбционной установки. Представлены данные по изменению концентрации углеводородов в очищаемой паровоздушной смеси при различной температуре.

Введение

Выбросы летучих органических соединений (ЛОС) представляют собой одну из наиболее серьезных экологических проблем нефтяной и перерабатывающей промышленности. Исследования показывают, что при максимальных объемах сливо-наливных операций на нефтебазах значительное количество углеводородов выбрасывается в атмосферу. В результате «больших и малых дыханий» при хранении нефти и нефтепродуктов ежегодно теряется от 50 до 90 млн т углеводородов из паровоздушных смесей (ПВС).

Власенко Виктор Сергеевич – доцент департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии; Слесаренко Вячеслав Владимирович – доктор технических наук, доцент, профессор департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии, e-mail: slesarenko.vv@dvfu.ru; Автомонов Евгений Геннадьевич – доцент департамента нефтегазовых технологий и нефтехимии; Гулевич Александр Игоревич – студент; Горошко Сергей Дмитриевич – студент, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия.

Выбросы ЛОС строго регулируются в различных странах мира. Например, в стандартах качества воздуха, разработанных Агентством по охране окружающей среды США, максимальная допустимая концентрация углеводородов за трехчасовой период составляет $1,6 \cdot 10^{-4}$ кг/м³, которая не должна превышать более одного раза в год. Аналогичный предел выбросов установлен Европейским сообществом.

Особое внимание уделяется выбросам паров углеводородов при погрузке нефти и нефтепродуктов. По данным [1], во время погрузки интенсивное испарение углеводородов приводит к увеличению избыточного давления в танках, что при недостаточной пропускной способности газоотводных систем может привести к выбросу газозооной смеси в атмосферу. Масштабы выбросов углеводородов по морским терминалам могут быть значительными: от 0,8 % и более от общего объема транспортируемого продукта. В России существует более 70 морских терминалов для перевалки жидких углеводородов. В целом максимальная пропускная способность портов по перевалке жидких углеводородов достигает более 600 млн т в год.

Операции на нефтяных терминалах, такие как хранение, погрузка и разгрузка, являются основными источниками выбросов ЛОС в окружающую среду. Во время погрузки нефти в танкеры легкие углеводороды испаряются, занимая пространство между поверхностью нефти и крышей резервуара. Эти пары вытесняются через вентиляционные системы танкера и выбрасываются в атмосферу.

Для сокращения выбросов ЛОС применяются различные технологические процессы, включая адсорбцию, криогенную конденсацию, абсорбцию, термическое и каталитическое окисление, а также мембранное разделение [2]. В ряде случаев применяются различные технологии восстановления или уничтожения углеводородов, при этом необходимо учитывать два ключевых аспекта [3]. Первый – величина потерь углеводородов при испарении, которая может быть рассчитана с использованием корреляций и уравнений при математическом моделировании. Второй аспект должен учитывать состав и динамику вентиляционного потока, варьирующиеся в зависимости от назначения терминала. Методы извлечения или разрушения ЛОС могут существенно отличаться в зависимости от свойств выделяемых газов и объема выбросов.

Например, внедрение проекта CCUS Porthos (порт Роттердам) для рекуперации паров позволило минимизировать выбросы углеводородов в атмосферу на 97 %, что значительно улучшило экологическую обстановку в регионе [4, 5]. Внедрение системы OPW Total Vapour Solution для рекуперации паров в порту Хьюстон [6] стало важным этапом в решении экологических проблем, связанных с выбросами летучих органических соединений в атмосферу.

Постановка задачи

В таблице 1 представлен анализ методов рекуперации паров и видов установок рекуперации паров (УРП), применяющихся на морских терминалах по перегрузке нефти и нефтепродуктов.

Таблица 1

Анализ методов рекуперации паров [8]

Метод рекуперации паров	Преимущества	Недостатки
Комбинированный	Высокая пропускная способность, степень очистки до 98 %, непрерывность процесса очистки, замкнутый цикл очистки	Работоспособность зависит от погодных условий, высокие капитальные затраты, снижение эффективности при повышении температуры адсорбента
Абсорбционный	Высокая пропускная способность, степень очистки до 98 %, непрерывность процесса очистки	Значительные габариты, работоспособность зависит от погодных условий, высокие материальные затраты
Адсорбционный	Высокая пропускная способность, степень очистки до 98 %, работоспособность не зависит от погодных условий, непрерывность процесса очистки	Работоспособность зависит от состава ПВС, затраты на очистку адсорберов, снижение эффективности при повышении температуры адсорбента
Мембранный	Безопасность, высокая степень очистки ПВС	Низкая пропускная способность, чувствительность к условиям эксплуатации, длительный процесс очистки мембран, дороговизна оборудования
Криогенный	Простота конструкции, степень очистки до 80 %, непрерывность процесса очистки	Необходимость дополнительных материалов, низкая пропускная способность, высокие капитальные затраты

Мировой опыт и практическое применение передовых технологий крупными нефтяными компаниями демонстрируют высокую эффективность использования абсорбционных и адсорбционных методов, которые позволяют достигать высоких показателей эффективности улавливания паров, в то время как технологии регенерации адсорбентов обеспечивают устойчивость и долговечность работы оборудования.

Однако эффективность работы современных УРП адсорбционного типа снижается за счет эффекта перегрева угольной загрузки фильтров. При адсорбции углеводородов в массе загруженного угля выделяется значительное количество теплоты. Так, теплота, высвобождаемая при адсорбции паров бензина равна приблизительно 450 кДж/кг. Температура в фильтре во время первой загрузки может достигать 130 °С [7]. Также следует отметить некоторые из недостатков, отмеченных при эксплуата-

ции адсорбционных УРП: отказы контрольно-измерительных приборов в результате перегрева, снижение требуемых свойств адсорбента из-за непостоянства температурного режима и обилия продуктов окисления.

Одним из наиболее эффективных решений для совершенствования УРП адсорбционного типа является применение установок на основе вихревой трубы (ВТ) Ранка–Хилша [9]. Суть вихревого эффекта заключается в разделении газа при закручивании в цилиндрической или конической камере на две фракции [10]. На периферии образуется закрученный поток с большей температурой, а в центре – закрученный охлажденный поток (рис. 1). Главные преимущества вихревых труб следующие: отсутствие необходимости в хладагентах и теплоносителях, простота конструкции,

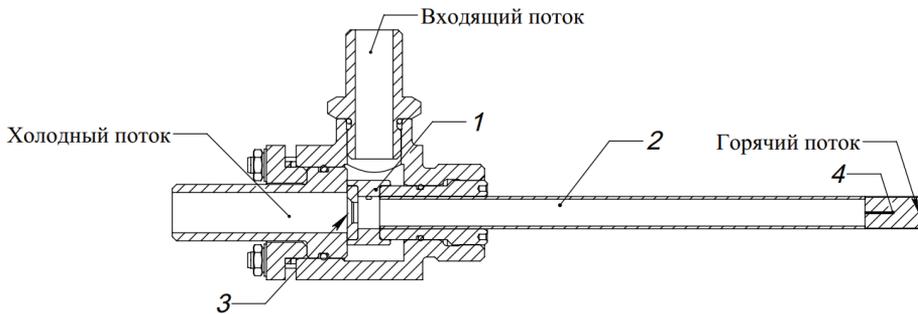


Рис. 1. Схема вихревой трубы:

1 – сопловый ввод; 2 – камера энергоразделения; 3 – диффузор холодного потока; 4 – регулирующий вентиль

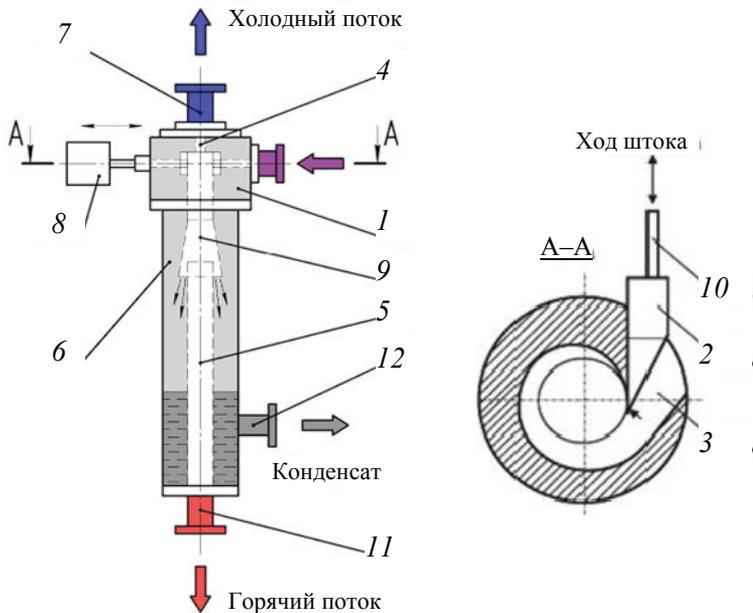


Рис. 2. Принципиальная схема регулируемой трехпоточной вихревой трубы [12]:

1 – корпус; 2 – регулирующий клин; 3 – сопловый ввод; 4 – диафрагма; 5 – вихревая камера; 6 – конденсатосборник; 7 – отвод холодного потока; 8 – приводной механизм; 9 – конус; 10 – шток для присоединения привода; 11 – отвод горячего потока; 12 – отвод конденсата

компактность, дешевизна изготовления, простота обслуживания и ремонта, отсутствие подвижных узлов и, как следствие, высокая надежность; высокая скорость выхода на рабочий режим, возможность осуществления нескольких процессов одновременно – охлаждение, нагрев и фазоотделение [11].

В качестве дополнительного вида ВТ на УРП может быть применена трехпоточная вихревая труба (рис. 2), обеспечивающая не только терморегуляцию процессов, но и сепарацию конденсирующихся компонентов (третий поток обеспечивает вывод конденсата).

Внедрение вихревых труб имеет потенциал для значительного уменьшения экологической нагрузки на портовую инфраструктуру и повышения экологической устойчивости эксплуатации портов.

Материалы и методы

Нефтеналивной порт в Козьмино (Находка) оснащен современной установкой по рекуперации паров нефти. Установка имеет производительность 14 500 м³/ч и включает восемь адсорберов с загрузочным объемом по 84 м³ каждый, заполненных активированным углем, колонну-абсорбер объемом 75 м³, заполненный металлической набивкой, 18 вакуумных насосов, каждый производительностью 2 500 м³/ч; насос откачки абсорбента производительностью 400 м³/ч; вентилятор производительностью 17 500 м³/ч; систему автоматики [7]. Адсорберы в Козьмино заполнены активированным углем, через которые проходят нефтяные пары из цистерн танкеров, заполняя их до определенного предела. Затем с помощью вакуумных насосов начнется обратный процесс: уголь отдает нефтяные пары (углеводороды) в абсорбер. С помощью абсорбента углеводороды возвращаются в цистерны.

Модернизация УРП на нефтеналивном порте Козьмино может быть основана на включении в техническую схему вихревых аппаратов (рис. 3). Технологическая схема с вихревой трубой для термостатирования адсорберов УРП подразумевает следующий принцип работы. Парогазовая смесь (ПГС) из танкера 1 поступает по линии I через огнепреградитель 2 и конденсатосборник 3 на адсорберы 4. Вихревая труба 5 работает как термостатирующее устройство и осуществляет охлаждение угольной загрузки адсорбера в режиме адсорбции по линии V с использованием ПГС из танкера через линию XV, либо очищенной ПГС через линию XIII, либо азотом через линию XIV. В то же время ВТ осуществляет подогрев угольной загрузки адсорбера в режиме регенерации по линии VI. Рабочий газ подается в ВТ при помощи компрессора 7 с последующим охлаждением на АВО 6. Десорбция углеводородов осуществляется по линии VII с помощью вакуумных насосов 8, которые подают ПГС на абсорбер 9. В абсорбере ПГС орошается жидкими углеводородами, которые подаются по линии IX. Уровень абсорбента контролируется с помощью линии X и насоса 10. Остаточные выбросы выходят через верх абсорбционной колонны и переносятся в работающий адсорбер для полного восстановления остатков углеводородов через линию III и с помощью воздуходувки 12 по линии XIII отводятся на свечу рассеивания 14. Для откачки конденсата при-

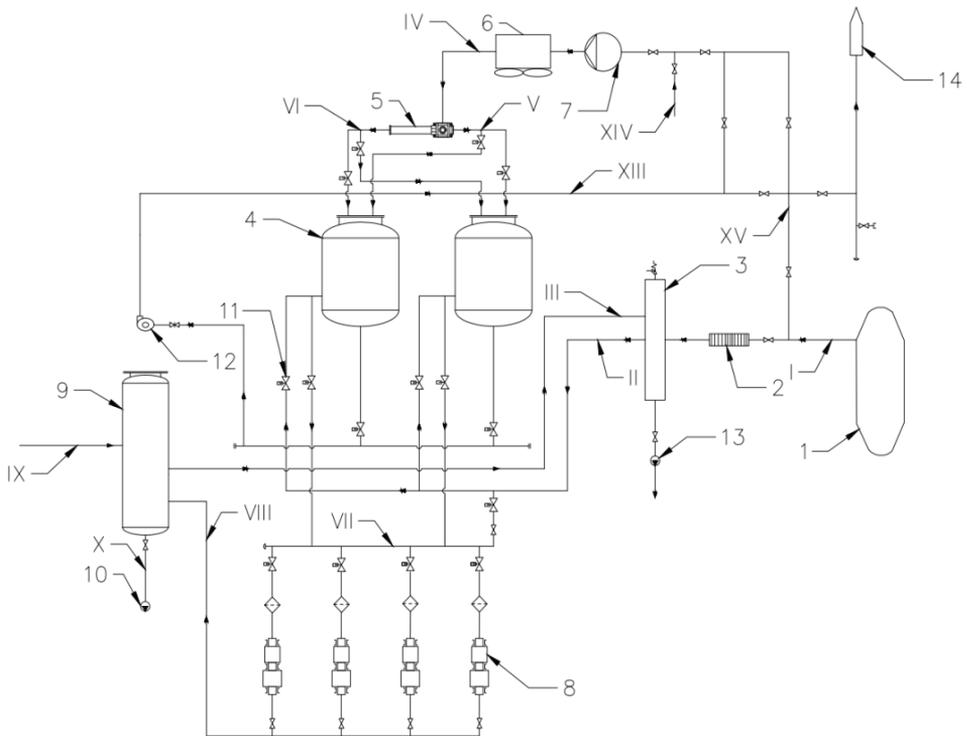


Рис. 3. Технологическая схема УРП на нефтеналивном порте Козьмино с вихревой трубой для термостатирования адсорберов:

I – ПГС с танкера на УРП; II – ПГС с танкера на адсорберы; III – возврат ПГС из абсорбера; IV – подача рабочего газа на ВТ; V – холодный поток после ВТ; VI – подогретый поток после ВТ; VII – ПГС на вакуумные насосы; VIII – ПГС на абсорбер; IX – линия подачи абсорбента; X – линия откачки абсорбента; XI – газ на свечу рассеивания; XII – линия подачи азота; XIII – линия подачи ПГС на ВТ

меняется насос 13. Задвижки II обеспечивают автоматическое изменение режима работы УРП.

Для обеспечения постоянного процесса адсорбции паров в установке адсорберы работают парами в группах на разных режимах. Для представленной схемы рассмотрим УРП с восьмью адсорберами и четырьмя циклами.

Активированный уголь, как один из наиболее эффективных адсорбентов, находит широкое применение в процессах очистки газов и жидкостей от загрязняющих веществ. В контексте адсорбции паровоздушной углеводородной смеси, активированный уголь демонстрирует способность поглощать компоненты с различным процентным соотношением, что обусловлено их физико-химическими характеристиками.

Для расчета конечной концентрации с термостатированием воспользуемся уравнением Дубинина–Астахова

$$C_k = C_n - e^{\left(\frac{\mu_a}{\beta E_0}\right)^n}, \quad (1)$$

где n – параметр, характеризующий свойства адсорбента, для микропористых углей $n = 1$; μ_a – адсорбционный потенциал; β – коэффициент афинности, численно равный отношению параметров исследуемого и стандартного адсорбатов; E_0 – средняя характеристическая энергия адсорбции для данного адсорбента.

Для расчета адсорбционного потенциала воспользуемся формулой

$$\mu_a = RT \ln \left(\frac{P}{P_0} \right), \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/(моль·К); T – температура, при которой происходит адсорбция, К; P и P_0 – соответственно конечное и начальное давление при процессе адсорбции.

С помощью уравнения (2) возможен пересчет температурной инвариантности на разные условия работы УРП. Для данного расчета предполагается, что в составе ПГС сера и губительные для активированного угля сернистые соединения отсутствуют.

Расчетная блок-схема состоит из адсорбера, абсорбера и вихревой трубы (рис. 4). Для начала расчета необходимо задаться следующими параметрами: начальной и конечной температурами ПГС. Для адсорбера определяются элементарный состав ПГС и адсорбционный потенциал; для абсорбера – начальная концентрация ПГС, равная конечной концентрации после процесса адсорбции, коэффициент распределения (растворимости). На выходе из абсорбера получаем итоговую концентрацию ПГС.

Для расчета процесса адсорбции и определения зависимости конечной концентрации от температуры взяты следующие температуры: для начальной концентрации ПГС 20 °С, для конечных –27,5 °С и –40 °С.

При расчете абсорбера с жидким поглотителем массовые (или мольные) расходы поглотителя и инертного, не растворяющегося в жидкости газа будут постоянными по высоте абсорбера. Выражая концентрации поглощаемого компонента в газе и жидкости в относительных массовых

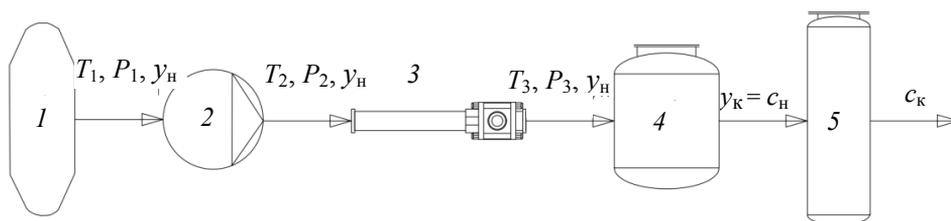


Рис. 4. Блок-схема для расчета УРП с узлом термостатирования и ВТ:

1 – танкер; 2 – компрессор; 3 – вихревая труба; 4 – адсорбер; 5 – абсорбер; T_1, T_2, T_3 – температура ПГС на выходе из танкера, компрессора, вихревой трубы соответственно; P_1, P_2, P_3 – давление ПГС на выходе из танкера, компрессора, вихревой трубы соответственно; y_H – начальный состав и концентрация компонентов ПГС из танкера; y_K – конечный состав и концентрация компонентов после адсорбера; c_H – начальный состав и концентрация компонентов ПГС на входе в абсорбер; c_K – конечный состав и концентрация компонентов ПГС на выходе из абсорбера

(или мольных) единицах, получим уравнение материального баланса (3). Расчет выполнен с помощью методики технологического расчета абсорбционной колонны [13]

$$M = G_y (\bar{Y}_n - \bar{Y}_k) = L (\bar{X}_k - \bar{X}_n), \quad (3)$$

где M – расход поглощаемого компонента, кг/с; G_y и L – расходы инертного газа и жидкого поглотителя соответственно, кг/с; \bar{Y}_n, \bar{Y}_k – концентрации поглощаемого компонента в газе на входе и выходе абсорбера соответственно, кг/кг инертного газа; \bar{X}_k, \bar{X}_n – концентрации поглощаемого компонента в жидкости соответственно на верху и внизу абсорбера, кг/кг жидкого поглотителя.

Из уравнения материального баланса (3) получаем формулу

$$L = M = G_y \frac{\bar{Y}_n - \bar{Y}_k}{\bar{X}_k - \bar{X}_n}. \quad (4)$$

Концентрацию \bar{X}_k находят в зависимости от равновесной концентрации \bar{X}_k^* и коэффициента избытка абсорбента ε по выражению

$$\bar{X}_k = \frac{\bar{X}_k^*}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где \bar{X}_k^* связана с начальной концентрацией газа \bar{Y}_k по закону Генри или задается в табличной форме при нелинейной связи $\bar{X}^* = f(\bar{Y})$.

Закон Генри выражается по формуле

$$m = \frac{E \mu}{p \cdot 1}, \quad (6)$$

где E – коэффициент Генри; μ – молярная масса абсорбента.

Также конечную концентрацию можно рассчитать через коэффициент растворимости по формуле

$$\bar{Y}_k = \bar{Y}_n (1 - K). \quad (7)$$

Коэффициент растворимости K показывает, насколько компонента углеводорода распределяется между газовой и жидкой фазой. Он зависит от различных факторов, таких как температура и давление. Для большинства углеводородов в нефти коэффициент распределения K можно найти в справочниках.

Результаты исследования

Результаты расчета адсорбционной установки для порта Козьмино до и после термостатирования показаны в табл. 2.

Применение метода термостатирования с ВТ в схеме УРП позволяет разделять поток ПГС на холодный и горячий за счет внутреннего перерас-

Таблица 2

Расчет концентрации ПГС при адсорбции

Компонент	Начальная концентрация ПГС, г/м ³	Конечная концентрация ПГС, г/м ³ , при температуре, °С		
		–26	4,9	19
CH ₄	9	9	9	9
C ₂ H ₆	34	30,87	31,46	31,46
C ₃ H ₈	104	42,9	46,88	96,19
C ₄ H ₈	37	1,73	1,82	5,21
C ₄ H ₁₀	77	3,58	3,77	10,81
C ₅ H ₁₀	24	0,46	0,48	11,85
C ₅ H ₁₂	29	0,23	0,24	8,36
C ₆ H ₁₄	32	0,1	0,11	4,44
Итого	346	88,87	93,76	177,32

пределения кинетической энергии молекул. Основным эффектом является обеспечение температурного перепада на холодном потоке от 0 до 60 °С (в зависимости от обеспечиваемого перепада давления и режима работы ВТ) без использования дополнительных источников охлаждения. Это приводит к улучшению термодинамических условий для таких процессов, как адсорбция и теплообмен, что в итоге повышает КПД системы на 10 – 15 %.

Предполагается, что ПГС будет поступать в вихревую трубу с температурой, равной температуре окружающего воздуха. Температуры выбраны по СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» для Владивостока: температура воздуха наиболее холодных суток –26 °С, среднегодовая – 4,9 °С и средняя температура воздуха в летний период 19 °С [14].

В порту Козьмино предусмотрена комбинированная система УРП для понижения концентрации ПГС на выходе (международные нормы выбросов составляют 35 г/м³). Для достижения необходимых показателей на УРП применен процесс адсорбции. Режим работы абсорбера также изменяется при применении ВТ для термостатирования.

Результаты расчета абсорбционной установки для порта Козьмино до и после термостатирования показаны в табл. 3, где начальные концентрации ПГС при адсорбции совпадают с конечными концентрациями адсорбции при таких же температурах (см. табл. 2).

Установлено, что абсорбционная установка показывает высокую эффективность для удаления тяжелых углеводородов из газовой смеси. Проведенные расчеты подтверждают эффективность применения ВТ в схеме УРП; КПД абсорбционной установки не изменился, но конечная концентрация ПГС на выходе с абсорбционной установки снизилась из-за изменения ее режима работы за счет внедрения вихревой трубы.

Таблица 3

Расчет концентрации ПГС при абсорбции

Компонент	Концентрация, г/м ³ , при температуре, °С					
	–26		4,9		19	
	начальная	конечная	начальная	конечная	начальная	конечная
СН ₄	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00	9,00
С ₂ Н ₆	30,87	14,03	31,46	14,30	31,46	26,22
С ₃ Н ₈	42,9	14,30	46,88	15,63	96,19	53,44
С ₄ Н ₈	1,73	0,87	1,82	0,91	5,21	2,08
С ₄ Н ₁₀	3,58	1,30	3,77	1,37	10,81	3,09
С ₅ Н ₁₀	0,46	0,13	0,48	0,14	11,85	2,63
С ₅ Н ₁₂	0,23	0,06	0,24	0,06	8,36	1,67
С ₆ Н ₁₄	0,1	0,02	0,11	0,02	4,44	0,63
Итого	88,87	39,7	93,76	41,43	177,32	98,76

Расчеты подтверждают, что в результате понижения температуры в технологических процессах степень рекуперации паров ПГС на УРП для нефти повысилась на 78 % при внедрении предлагаемой технологической схемы с термостатированием.

Заключение

В ходе исследования разработана и проанализирована технология термостатирования адсорберов с применением вихревых труб для повышения эффективности процессов рекуперации паров углеводородов. Проведенные расчеты и эксперименты (ранее проведенные испытания ВТ) подтвердили, что использование ВТ способствует снижению температуры адсорбента, что увеличивает его способность к поглощению углеводородов. Это в свою очередь позволяет значительно уменьшить концентрацию углеводородов в выбросах, повысить степень очистки парогазовых смесей.

Кроме того, применение вихревых труб способствует снижению эксплуатационных потерь углеводородов и повышению экологической безопасности нефтяных терминалов. По данным расчетов в результате внедрения предложенной технологии эффективность системы рекуперации паров увеличивается на 78 %. Это не только снижает негативное воздействие на окружающую среду, но и повышает экономическую эффективность за счет возврата улавливаемых углеводородов в технологический процесс.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют перспективность внедрения вихревых труб в системы рекуперации паров на нефтена-

ливных терминалах. Дальнейшие исследования могут быть направлены на автоматизацию процессов управления технологией.

Для более точного обоснования эффективности модернизации УРП с использованием рассмотренной технологии необходимы экспериментальные исследования на объекте внедрения.

Список литературы

1. Invernizzi, M. Odour Emission Rate Estimation Methods for Hydrocarbon Storage Tanks / M. Invernizzi, S. Sironi // *Chemical Engineering Transactions*. – 2021. – Vol. 85. – P. 67 – 72. doi: 10.3303/CET2185012
2. ПНСТ 817-2023 (ISO/TR 27912:2016). Улавливание, транспортирование и хранение углекислого газа. Системы, технологии и процессы улавливания диоксида углерода = Carbon dioxide capture, transportation and storage. Carbon dioxide capture systems, technologies and processes. – Введ. 2023-07-01. – 34 с. – URL : https://czbt.ru/wp-content/uploads/2023/07/PNST-817-2023-ISOTR-279122016-Ulavlivanie-transportirovanie-i-hranenie-uglekislogo-gaza...._Tekst.pdf (дата обращения: 30.09.2025).
3. Коршак, А. А. Оценка области применения установок рекуперации паров нефтепродуктов по зарубежным данным / А. А. Коршак, А. А. Зябкин, А. В. Захарченко // *Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов*. – 2023. – № 3(13). – С. 252 – 260. doi: 10.28999/2541-9595-2023-13-3-252-260
4. Kok, M. V. Application of Vapor Extraction (VAPEX) Process on Carbonate Reservoirs / M. V. Kok, Yu. Yildirim, S. Akin // *Energy Sources*. – 2009. – Part A, No. 5. – P. 377 – 386. doi: 10.1080/15567030701468076
5. Porthos project CO₂ reduction through storage beneath the North Sea. – 14 p. – URL : <https://www.porthosco2.nl/wp-content/uploads/2020/03/Brochure-ENG-2019-2.pdf> (дата обращения: 23.01.2025).
6. Environmental // Port Houston. – URL : <https://porthouston.com/> (дата обращения: 23.01.2025).
7. Слесаренко, В. В. Совершенствование установок рекуперации паров нефти для снижения вредных выбросов в атмосферу / В. В. Слесаренко, В. Д. Лапшин, П. А. Соколова // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2013. – № S3. – С. 182 – 189.
8. Шестаков, Р. А., Установки рекуперации паров нефти и нефтепродуктов: анализ и особенности применения / Р. А. Шестаков, А. А. Комягин, И. Ф. Дяченко // *Neftegaz.RU*. – URL : <https://magazine.neftgaz.ru/articles/transportirovka/813763-ustanovki-rekuperatsii-parov-nefti-i-nefteproduktov-analiz-i-osobennosti-primeneniya/> (дата обращения: 26.01.2025).
9. Three-Flow Vortex Tube: The Effect of Swirling Method and Separation Insert Gap on Operational Efficiency / A. A. Yudakov, V. S. Vlasenko, V. V. Slesarenko, A. N. Gulkov, K. I. Bashirov // *International Journal of Thermal Sciences*. – 2022. – Vol. 173. – P. 107399. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107399
10. Анализ теплофизических процессов в вихревых трубах / Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников, Г. Ш. Пиралишвили, О. В. Василюк // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника*. – 2017. – № 49. – С. 127 – 141. doi: 10.15593/2224-9982/2017.49.12
11. Белоусов, А. М. Вихревая труба Ранка-Хилша как перспективное устройство получения низких температур / А. М. Белоусов, И. Х. Исрафилов, С. И. Хар-

чук // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия Холодильная техника и кондиционирование. – 2014. – № 2. – С. 36 – 44.

12. Жидков, Д. А. Разработка и исследование высокорасходных трехпоточных вихревых труб с целью повышения эффективности низкотемпературной очистки углеводородных газов : дис. ... канд. техн. наук : 05.04.03 / Жидков Дмитрий Алексеевич. – М., 2020. – 157 с.

13. Технологические расчеты абсорбционной колонны // Stoodwood. – URL : https://studwood.net/1602489/tovarovedenie/tehnologicheskie_raschety_absorbtsionny_kolonny?utm_so (дата обращения: 19.01.2025).

14. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. – URL : <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (дата обращения: 15.01.2025).

References

1. Invernizzi M., Sironi S. Odour Emission Rate Estimation Methods for Hydrocarbon Storage Tanks, *Chemical Engineering Transactions*, 2021, vol. 85, pp. 67-72. doi: 10.3303/CET2185012

2. Available at: https://czbt.ru/wp-content/uploads/2023/07/PNST-817-2023-ISOTR-279122016-Ulavlivanie-transportirovanie-i-hranenie-uglekislogo-gaza...._Tekst.pdf (accessed 30 September 2025).

3. Korshak A.A., Zhabkin A.A., Zakharchenko A.V. [Assessment of the field of application of petroleum product vapor recovery units based on foreign data], *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov* [Science and technology of pipeline transportation of oil and oil products], 2023, no. 3(13), pp. 252-260. doi: 10.28999/2541-9595-2023-13-3-252-260

4. Kok M.V., Yildirim Yu., Akin S. Application of Vapor Extraction (VAPEX) Process on Carbonate Reservoirs, *Energy Sources*, 2009, part A, no. 5, pp. 377-386. doi: 10.1080/15567030701468076

5. Porthos project CO₂ reduction through storage beneath the North Sea, 14 p., available at: <https://www.porthosco2.nl/wp-content/uploads/2020/03/Brochure-ENG-2019-2.pdf> (accessed 23 January 2025).

6. Available at: <https://porthouston.com/> (accessed 23 January 2025).

7. Slesarenko V.V., Lapshin V.D., Sokolova P.A. [Improvement of oil vapor recovery units to reduce harmful emissions into the atmosphere], *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin], 2013, no. S3, pp. 182-189. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Available at: <https://magazine.neftegaz.ru/articles/transportirovka/813763-ustanovki-rekuperatsii-parov-nefti-i-nefteproduktov-analiz-i-osobennosti-primeneniya/> (accessed 26 January 2025).

9. Yudakov A.A., Vlasenko V.S., Slesarenko V.V., Gulkov A.N., Bashirov K.I., Three-Flow Vortex Tube: The Effect of Swirling Method and Separation Insert Gap on Operational Efficiency, *International Journal of Thermal Sciences*, 2022, vol. 173, pp. 107399. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107399

10. Piralishvili Sh.A., Veretennikov S.V., Piralishvili G.Sh., Vasilyuk O.V. [Analysis of thermophysical processes in vortex tubes], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika* [Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Aerospace engineering], 2017, no. 49, pp. 127-141. doi: 10.15593/2224-9982/2017.49.12 (In Russ., abstract in Eng.)

11. Belousov A.M., Israfilov I.Kh., Kharchuk S.I. [Ranque-Hilsch vortex tube as a promising device for obtaining low temperatures], *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya*

Kholodil'naya tekhnika i konditsionirovaniye [Scientific journal of NRU ITMO. Series: Refrigeration and air conditioning], 2014, no. 2, pp. 36-44. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Zhidkov D.A. *PhD of Candidate's thesis (Engineering)*, Moscow, 2020, 157 p. (In Russ.)

13. Available at: https://studwood.net/1602489/tovarovedenie/tehnologicheskie_raschety_absorbtsionnoy_kolonny?utm_so (accessed 19 January 2025).

14. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573659358> (accessed 15 January 2025).

Thermostating of Adsorbers Using a Vortex Tube in Hydrocarbon Emissions Cleaning Systems

**V. S. Vlasenko, V. V. Slesarenko, E. G. Avtomonov,
A. I. Gulevich, S. D. Goroshko**

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

Keywords: absorption; adsorption; vortex tube; vapor recovery; thermostating; hydrocarbon emissions.

Abstract: This paper examines thermostating technologies using vortex tubes to improve the efficiency of hydrocarbon removal processes from steam-gas mixtures and prevent hydrocarbon emissions into the atmosphere. This article examines the emissions of volatile organic compounds during loading and unloading operations at oil terminals, where intense hydrocarbon evaporation leads to environmental pollution. Calculations of the efficiency of a combined adsorption-absorption unit are presented. Data on changes in hydrocarbon concentrations in the purified vapor-air mixture at various temperatures are presented.

© В. С. Власенко, В. В. Слесаренко, Е. Г. Автомонов,
А. И. Гулевич, С. Д. Горошко, 2025