

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-536-550>

УДК 621.6; 62.9; 697.9; 621.638

Анализ экспериментальных данных применения дегазационно-вентиляционного устройства при дегазации газгольдеров, содержащих низконапорный газ пропан

Е. А. Пехота¹⁾, В. Н. Романюк¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье рассмотрены основные этапы проведенного исследования разработанной технологии дегазации, обеспечивающей энергоэффективность и экологичность производственного процесса. Представленный анализ содержит обоснование актуальности исследования в рамках действующего законодательства и требований промышленной безопасности при организации газоопасных работ и технической надежности газгольдеров. Отмечено, что сокращение затрат на выполнение дегазации является одной из приоритетных задач научного и прикладного характера, ввиду того что на этот процесс расходуются значительные энергоресурсы, применяются специально подготовленная вода для пара и сложное технологическое оборудование, требующее привлечения высококвалифицированных и специально обученных специалистов. Приведены основные технические характеристики и функциональное назначение элементов установки, описаны достоинства разработанного дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450. На основе проведенного исследования определены наиболее эффективные эмпирические значения предельно допустимых концентраций и условия их достижения с учетом расчетов материального баланса. Обоснованы основные этапы дегазации газгольдера и математически определены зависимости продолжительности каждого из трех этапов с использованием математических расчетов. По результатам эксперимента произведена оценка ключевых стадий исследования, выполнен анализ полученных контрольных показателей, на основе которых проведены математические расчеты и моделирование процесса разработанной технологии дегазации газгольдера. Выявлена зависимость изменения концентрации кислорода в газовом пространстве газгольдера от времени дегазации и определена целесообразность ее учета при определении критериев качественной оценки процесса. Представлена полученная диаграмма изменения концентрации кислорода при дегазации газгольдера в зависимости от скорости ее снижения на разных этапах, которые в совокупности позволяют определить оптимальное время дегазации, выполнить экономические расчеты для оценки эффективности процесса. На основании представленных основных научных и технических результатов определены обоснованные критерии оценки получения экологичности производственной деятельности и низкого энергопотребления по сравнению с пропаркой в условиях подготовки технологического оборудования сжиженных углеводородных газов, эксплуатирующегося в среде пропана.

Ключевые слова: дегазация, газгольдер, сжиженный газ, пропан, процесс дегазации, вредные вещества, дегазационно-вентиляционное устройство, вентиляционный процесс, энергоэффективная дегазация

Для цитирования: Пехота, Е. А. Анализ экспериментальных данных применения дегазационно-вентиляционного устройства при дегазации газгольдеров, содержащих низконапорный газ пропан / Е. А. Пехота, В. Н. Романюк // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. Т. 68, № 6. С. 536–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-536-550>

Адрес для переписки

Пехота Елена Александровна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 379-76-22
pehota@bntu.by

Address for correspondence

Pekhota Elena A.
Belarusian National Technical University
65, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 379-76-22
pehota@bntu.by

Analysis of Experimental Data on the Use of a Degassing and Ventilation Device for Degassing Gas Holders Containing Low-Pressure Propane Gas

E. A. Pekhota¹⁾, V. N. Romaniuk¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article discusses the main stages of the study of the developed degassing technology that ensures energy efficiency and environmental friendliness of the production process. The presented analysis substantiates the relevance of the study within the framework of the current legislation and industrial safety requirements for the organization of gas-hazardous works and the technical reliability of gas holders. It was noted that reducing the cost of degassing is one of the priority tasks of a scientific and applied nature, due to the fact that this process consumes significant energy resources, uses specially prepared water for steam and complex technological equipment that requires the involvement of highly qualified and specially trained specialists. The main technical characteristics and functional purpose of the unit elements are given, and the advantages of the developed degassing and ventilation device ДВУ-ФС[DVU-FS]-1/450 are described. On the basis of the study, the most effective empirical values of maximum permissible concentrations and the conditions for their achievement were determined, taking into account the calculations of the material balance. The main stages of gas tank degassing are substantiated and the dependencies of the duration of each of the three stages are mathematically determined using mathematical calculations. Based on the results of the experiment, the key stages of the study were evaluated, an analysis of the obtained control indicators was carried out, on the basis of which mathematical calculations and modeling of the process of the developed gas tank degassing technology were carried out. The dependence of the change in the oxygen concentration in the gas space of the gas holder on the time of degassing was revealed and the expediency of taking it into account when determining the criteria for the qualitative assessment of the process was determined. The obtained diagram of the change in oxygen concentration during degassing of a gas holder is presented, depending on the rate of its decrease at different stages, which together make it possible to determine the optimal degassing time and perform economic calculations to assess the efficiency of the process. Based on the presented main scientific and technical results, substantiated criteria for assessing the environmental friendliness of production activities and low energy consumption have been determined in comparison with steaming in the conditions of preparation of technological equipment for liquefied petroleum gases operating in a propane environment.

Keywords: degassing, liquefied gas, reduced gas, propane, degassing process, harmful substances, degassing and ventilation device, ventilation process, energy-efficient degassing

For citation: Pekhota E. A., Romaniuk V. N. (2025) Analysis of Experimental Data on the Use of a Degassing and Ventilation Device for Degassing Gas Holders Containing Low-Pressure Propane Gas. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 68 (6), 536–550. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2025-68-6-536-550> (in Russian)

Введение

Согласно Закону Республики Беларусь «О промышленной безопасности» [1] и иным актам законодательства, в нашей стране необходимо обеспечивать при эксплуатации опасных производственных объектов оптимальное состояние защищенности жизненно важных интересов личности и общества от возникновения аварий и инцидентов за счет комплекса организационных и технических мероприятий, реализуемых на предприятии [2].

Вопросы дегазации оборудования и устройств, задействованных в газоснабжении, по своей общей совокупности принято относить к вопросам промышленной безопасности. Это в основном связано с производственной необходимостью применения метода дегазации как безусловного организационного процесса, необходимого в соответствии с действующими правилами организации безопасного производства работ в нефтяной, химической и газовой промышленности. При этом дегазация, или нейтрализация, как процесс означает принудительное удаление газообразных веществ на опасном производственном объекте до нормативных значений предельно допустимых вредных веществ в рабочей зоне.

Поскольку дегазация сосудов, работающих под давлением (газгольдеры, емкости аммиачно-холодильных установок, нефти, газа и т. п.), является важной задачей в контексте выполнения требований промышленной безопасности и обеспечения безаварийной работы взрывоопасного оборудования, их применение должно отвечать строгим стандартам, требованиям правил и рекомендациям, действующим в этой сфере производственной деятельности [1, 2]. В связи с этим особое внимание уделяется системам контроля и мониторинга, способным оперативно реагировать на изменения в техническом состоянии оборудования. Это позволяет минимизировать риски, связанные с утечками токсичных газов или образованием взрывоопасных смесей в рабочей зоне размещения сосудов, работающих под давлением. Также безопасность требует периодических освидетельствований и испытаний, технического обслуживания оборудования, расположенного во внутренней части емкости, и проведения технического диагностирования с применением неразрушающих методов контроля. Но без тщательной подготовки к газоопасным работам с применением дегазации перечисленные виды работ не допускаются.

Основным методом дегазации на производственных объектах в настоящее время является пропарка. Она заключается в подаче высокотемпературного пара с параметрами 120 °С и выше под давлением от 0,15 до 3 МПа, с разогревом внутренней поверхности в течение продолжительного времени (не менее четырех часов в зависимости от вместимости газгольдера, вида хранимого газообразного вещества и т. п.).

Сокращение затрат на выполнение дегазации является одной из приоритетных задач научного и прикладного характера, ввиду того что на этот процесс расходуются значительные энергоресурсы, применяются специально подготовленная вода для пара, сложное технологическое оборудование, требующее привлечения высококвалифицированных и специально обученных специалистов, обеспечивающих работу паровой установки. В то же время следует учитывать, что возникает необходимость в очистке или утилизации сконденсировавшихся после дегазации и загрязненных остатков, образующихся от зачистки внутренней поверхности. Объем загрязненных остатков может превышать 1000 л, и при этом в атмосферный воздух непрерывно в процессе дегазации выделяются вредные вещества.

Для снижения затрат и экологических последствий процесс дегазации требует разработки и применения научно обоснованных современных вентиляционно-дегазационных устройств и технологий, обеспечивающих безопасное удаление остаточных низконапорных газовоздушных смесей, аэрозолей и газов.

Успешная разработка и применение новых технологических процессов организации дегазации газгольдеров становится залогом не только снижения затрат на проведение работ по дегазации, но и защиты и сохранения техносферы и экосистемы в целом.

Таким образом, вопрос дегазации технологического оборудования, применяемого для хранения различных газов и химической продукции, следует рассматривать не только как метод устранения угрозы взрыва, но и как неотъемлемую часть комплексной системы управления производственными рисками и охраны окружающей среды. Важно учитывать, что не все виды дегазации одинаково эффективны в разных условиях. Например, в различных отраслях могут требоваться специфические подходы к дегазации, основанные на особенностях технологических процессов.

При этом ключевым аспектом является строгое соблюдение регламентов и норм безопасности, что предполагает наличие четко разработанных процедур дегазации. Правильная организация процессов дегазации не только снижает риски для окружающей среды и здоровья работников, но и позволяет значительно сократить потенциальные экономические потери и экологические налоговые сборы.

Для успешной разработки и реализации методов дегазации выполнен комплекс исследований нового разработанного производственного процесса и режимов дегазации с использованием специализированных технологий, оборудования, приспособлений и новейших материалов.

Разработка нового оборудования и методов дегазации должна обеспечивать энергетическую и экономическую эффективность, а также снижать воздействие на окружающую среду за счет сокращения выбросов вредных веществ при осуществлении данного процесса.

Актуальность использования горючих отходов

Анализ зарубежных наработок показал, что дегазация в основном осуществляется с применением различных жидкостных и безжидкостных методов, позволяющих удалять токсичные и взрывоопасные вещества физическими и механическими способами, включающими в том числе смывание токсинов с твердой поверхности струей воды, паром, потоком горячих газов, органическими растворителями или растворами поверхностно-активных веществ (ПАВ), связывание токсикантов, присутствующих, например, в воде, с помощью сорбентов; изоляцию поверхности путем дегазации инертными материалами. В отдельных случаях возможен процесс естественной дегазации, но он экономически не выгоден, так как занимает существенный период времени и простой специализированного оборудования.

Дегазация в газовой отрасли – реальная необходимость, так как при выполнении регламентных работ в эксплуатируемых газгольдерах всегда имеются в наличии неиспаряемые жидкие остатки и пирофорные отложения на внутренней поверхности. Причинами их образования являются разные факторы. В качестве неиспаряемых остатков могут выступать тяжелые фракции хранимых газопродуктов, которые остаются после переработки, или жидкий бутан, который со временем не способен переходить из жидкого состояния в газообразное. Причин этому может быть несколько, но основная – это применение одной емкости для хранения и транспортировки разных продуктов. Если перед заправкой сжиженными углеводородными газами (СУГ) резервуар газовоза или железнодорожной цистерны не был нормально очищен, в пропан-бутановую смесь вполне может попасть посторонняя фракция, которая в процессе слива, налива и эксплуатации газгольдера осядет на дне, занимая полезный объем емкостей газохранилища. Поэтому дегазация для зачистки емкостей проводится с определенной периодичностью, как правило, не реже одного раза в два года.

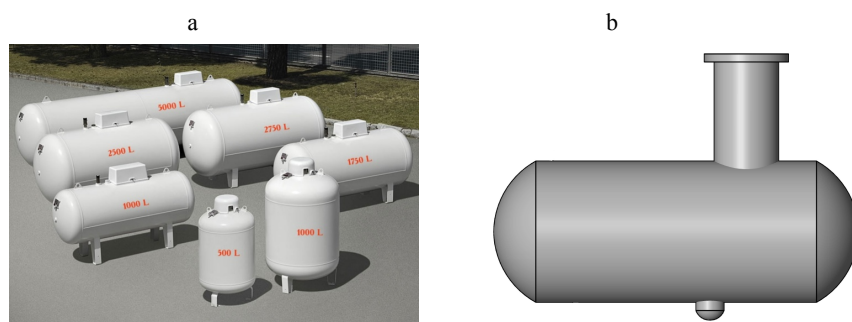


Рис. 1. Газгольдеры, применяемые на опасных производственных объектах:
а – вертикальные и горизонтальные с указанием объемов вместимости;
б – вид газгольдера, исследуемого в ходе эксперимента

Fig. 1. Gas holders used at hazardous production facilities:
a – vertical and horizontal gas holders with indicated capacity volumes;
b – type of gas holder studied during the experiment

Традиционными способами дегазации в Республике Беларусь, применяемыми на опасных производственных объектах, являются: пропаривание (традиционное и импульсное); вентиляция (естественная и дефлекторная); принудительная вентиляция.

Учитывая, что основная цель – сокращение затрат на процесс дегазации, актуальными задачами являются исследование и разработка нового технологического процесса и конструкции оборудования, позволяющих наиболее эффективно осуществлять дегазацию с возможностью снижения затрат энергоресурсов и вредных выбросов в окружающую среду. Это является актуальным направлением, так как традиционные способы проведения дегазации не обеспечивают полный сбор и снижение выбросов низконапорного газа пропана и других вредных химических компонентов, содержащихся в отложениях газгольдеров. В связи с этим для достижения

цели выполнены исследования технологического процесса вентилирования внутренней поверхности газгольдеров.

Материалы исследования для обсуждения

Дегазируемый технологический аппарат (газгольдер), находящийся длительное время в эксплуатации, после опорожнения содержит пирофорные отложения на всей внутренней поверхности стенок, остаточные газы и мертвый остаток сжиженных тяжелых газов или веществ в виде индивидуальной жидкости, а также многокомпонентные углеводородные смеси в жидком состоянии (аэрозоли, конденсаты, жидкие пирофорные отложения и т. п.) [3].

Применяемые традиционные способы подготовки газгольдеров к техническому диагностированию и планово-предупредительным ремонтам относятся к взрыво- и пожароопасным работам. Основными видами опасности являются электризация технологических операций по очистке стенок внутренней поверхности (как правило, при пропарке и сливе остатков свободнопадающей струей) и взрывоопасность от искрообразования при очистке стенок от остатков, использовании костюмов и снаряжения, не имеющих электростатических нитей в структуре и др. [3, 4].

В соответствии с требованиями нормативных документов значение предельно допустимых концентраций (ПДК) можно определить по следующей формуле:

$$k^{\text{ПДК}} = \frac{k^{\text{НКП}}}{20}, \quad (1)$$

где $k^{\text{ПДК}}$ – предельно допустимая концентрация пропана, $\text{кг}/\text{м}^3$; $k^{\text{НКП}}$ – нижний концентрационный предел распространения пламени, $\text{кг}/\text{м}^3$ [3, 4].

Учитывая, что энергетические и материальные затраты на обработку газгольдеров паром существенные, а в процессе подготовки газгольдера с использованием пара возможно образование разрядов статического электричества вследствие множественного падения капель пароводяного конденсата, а также струйных ударов пара о технологические элементы конструкции, имеющиеся внутри газгольдера, нами допустимо определено, что снижение затрат достижимо с применением методов принудительного дегазационного вентилирования (ПДВ). ПДВ позволяет обеспечивать процесс дегазации с контролируемыми изменяемыми зависимыми переменными физико-химических параметров.

При разработке технологических методов, связанных со снижением воздействия химических веществ, в исследованиях на основании полученных данных проводятся разнообразные расчеты, обеспечивающие количественную оценку протекающих процессов с подбором реакционных взаимодействий, а также оптимальные значения параметров технологического процесса [4]. Во всех случаях при расчетах учитываются законы термодинамики, тепло- и массопередачи, а также химической кинетики.

Поэтому для анализа и оценки необходимо выполнение расчетов, связанных с определением материального баланса.

Материальный баланс – это вещественное выражение закона сохранения массы вещества, согласно которому во всякой замкнутой системе масса веществ, вступивших во взаимодействие, равна массе веществ, образовавшихся в результате этого взаимодействия, т. е. приход вещества $\Sigma G_{\text{прих}}$ равен его расходу $\Sigma G_{\text{расх}}$. Таким образом, уравнение материального баланса можно представить в виде [4]

$$\Sigma G_{\text{прих}} = \Sigma G_{\text{расх}} \quad (2)$$

Определение материального баланса позволяет не только учитывать входные потоки чистого атмосферного воздуха и выходные потоки смеси входящего чистого потока воздуха с дегазируемыми веществами, но и выявлять возможные утечки, неучтенные реакции и иные отклонения процесса. Анализ материального баланса необходим для оптимизации операций, что позволит определить направления, обеспечивающие в совокупности повышение эффективности дегазации низконапорного газа, находящегося в остаточном состоянии в газгольдере. Для расчета материального баланса используем законы стехиометрических соотношений [4], в соответствии с которыми общая масса всех поступающих в сосуд (реактор) материалов и веществ (приход) равна общей массе всех выходящих материалов и веществ (расходу), а также если известна масса хотя бы одного участника реакции, можно определить массы всех остальных, предварительно рассчитав их молярные массы.

Процесс дегазационного вентилирования технологического оборудования, применяемого на опасных производственных объектах, в общем виде можно описать дифференциальным уравнением материального баланса

$$Vdk_{\text{гп}} + qk_{\text{гп}}dt - qk_{\text{пв}}dt = Mdt, \quad (3)$$

где V – объем газгольдера, м^3 ; q – расход приточного воздуха в газгольдер при дегазации; $k_{\text{гп}}$ – контролируемая концентрация газообразных веществ во внутреннем пространстве газгольдера; $k_{\text{пв}}$ – то же газообразных веществ в приточном воздухе; M – интенсивность дегазации газгольдера, которая определяется экспериментально с учетом скорости подаваемого воздушного потока в условиях принудительной дегазации газгольдера; t – время, необходимое на полную дегазацию с доведением газгольдера до предельных значений ПДК, с.

Согласно действующим требованиям по дегазации газгольдеров для выполнения технического диагностирования, обслуживания и всех видов ремонта, регламентирующим в том числе процесс его освобождения (включая технологическое оборудование и приборы) от остатков («тяжелого» газа, пирофорных отложений и других взрывопожароопасных химических элементов) газообразных веществ, установлена остаточная загазован-

ность, определяемая приборным методом, которая составляет 0 % значения ПДК.

В ходе исследования процесса дегазации установлена одна из неизвестных значимых переменных – время t . Ее значение является одной из переменных и будет варьироваться в зависимости от организации процесса дегазации и характеристик применяемого и дегазируемого оборудования, а именно от:

- атмосферных условий (температуры газообразной среды, конденсатов, жидкой газовой фракции или «тяжелых» газов);
- технических характеристик применяемого вентиляционно-дегазационного оборудования (производительность, диаметр выходного патрубка и его длина, потребляемая мощность и т.п.);
- общего объема вместимости пропана и инженерной конструкции газгольдера (наличие внутренних трубопроводов, регазифицирующих устройств, отстойников-сборников, стационарных лестниц, сливных устройств и т. п. (рис. 1);
- расхода, давления воздушного потока и температуры, подаваемой в газгольдер приточного воздуха;
- химического состава и объемного количества, находящихся в нем остаточных фракций хранимого продукта и пирофорных отложений на внутренней поверхности.

В ходе проведенных исследований определено, что при дегазации газгольдера с жидким остатком пропана этот процесс протекает в несколько этапов, преимущественно отличающихся изменением концентрации вредных веществ в ходе дегазации до минимальных значений.

На этапе I интенсивность изменения концентрации паров паровой фазы в газгольдере существенна ввиду поступления в газгольдер потоков воздуха с большей плотностью с подаваемым атмосферным приточным воздухом.

На этапе II интенсивность изменения концентрации паров паровой фазы замедлилась и с малыми погрешностями устойчиво сохраняется (происходит уравнивание плотности газовой среды и продолжается поддерживаться интенсификация испарения имеющихся жидких остатков и пирофорных отложений).

На этапе III интенсивность изменения концентрации паровой фазы значительно снижается.

Для определения времени процесса полной дегазации газгольдера до безопасной предельно допустимой концентрации вредных веществ в составе внутреннего объема необходимо рассчитать суммарную численность времени, затраченного на всех этапах дегазации газгольдера:

$$t_{\text{общ}} = t_1 + t_2 + t_3. \quad (4)$$

Продолжительность каждого этапа можно определить по формулам:

– для этапа I дегазации газгольдера с низконапорным газом пропаном

$$t_1 = \frac{V}{q} \ln \frac{M_1 - qk_0}{M_1 - qk_{02}}; \quad (5)$$

– для этапа II дегазации (при наличии однокомпонентного дегазируемого остатка газа пропана)

$$t_2 = \frac{G_0}{M_2}; \quad (6)$$

– для этапа II дегазации (при наличии многокомпонентного дегазируемого остатка в смеси пропана и пирофорных отложений)

$$t_2 = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{M_{\text{нач}}}{k_{02}(q - \alpha V)}; \quad (7)$$

– для этапа III дегазации газгольдера

$$t_3 = \frac{V}{q} \ln \frac{k_{03}}{k_{\text{без}}}, \quad (8)$$

где k_0 – первичная концентрация паровой фазы в газгольдере на начало дегазации, измеренная при вскрытии; k_{02} – промежуточная концентрация паровой фазы в начале второго этапа дегазации; k_{03} – то же паровой фазы в начале третьего этапа дегазации; $k_{\text{без}}$ – достигнутые показатели предельно допустимой концентрации при дегазации.

Исходя из полученных результатов эксперимента, определены значения интенсивности изменения концентрации остатков газа пропана и в смеси газов пропана с пирофорными отложениями. Обработка полученных экспериментальных данных показала, что в расчетах допускается принимать интенсивность дегазации относительно постоянной величины скорости подаваемого воздушного потока в условиях принудительной дегазации газгольдера в виде равенства

$$M = M_{\text{нач}} = M_1 = M_n. \quad (9)$$

Продолжительности процессов дегазации на этапе II для одно- и многокомпонентных дегазируемых веществ различны. Это обусловлено тем, что в отличие от однокомпонентных остатков у многокомпонентных дегазируемых веществ интенсивность испарения уменьшается во времени по экспоненциальной зависимости. Для многокомпонентного остатка дегазируемого вещества интенсивность испарения можно рассчитать по представленной формуле

$$M_n = M_{\text{нач}} \exp(-r_{\text{кз}} t), \quad (10)$$

где $M_{\text{нач}}$ – интенсивность испарения исходных остатков дегазируемых взрывоопасных веществ; $r_{\text{кз}}$ – коэффициент корреляционной зависимости,

значение которого изменяется от физико-химических свойств дегазируемых остатков.

На рис. 2 приведен график изменения интенсивности концентрации паровой фазы пропана в дегазируемом газгольдере.

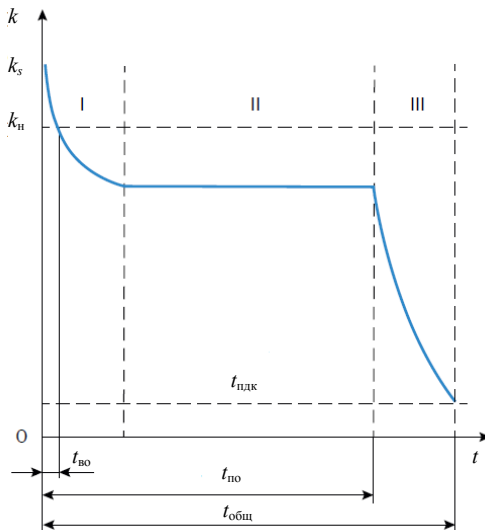


Рис. 2. График изменения интенсивности концентрации пропана в газгольдере:

$t_{\text{во}}$ – продолжительность опасности взрыва; $t_{\text{по}}$ – продолжительность опасности пожара;
 $t_{\text{общ}}$ – общая продолжительность дегазации; k_n – нижний концентрационный предел паров вредных и взрывопожароопасных веществ, $\text{кг}/\text{м}^3$; k_s – концентрация насыщенных паров вредных и взрывопожароопасных веществ при дегазации

Fig. 2. Graph of changes in the intensity of propane concentration in a gas tank:

$t_{\text{во}}$ – duration of explosion hazard; $t_{\text{по}}$ – duration of fire hazard;
 $t_{\text{общ}}$ – total duration of degassing; k_n – lower concentration limit of vapors of hazardous and explosive substances, kg/m^3 ; k_s – concentration of saturated vapors of hazardous and explosive substances during degassing

Для остатков пропана интенсивность испарения можно определить, используя формулу [3, 5–7]:

$$M = 10^{-6} \eta_i p_n \sqrt{\mu}, \quad (11)$$

где p_n – давление паровой фазы при нормированной температуре жидкой фазы в газгольдере; μ_i – коэффициент изменения испарения в зависимости от скорости и температуры воздушного потока над поверхностью, кПа ; μ – молярная масса, $\text{кг} \cdot \text{кмоль}^{-1}$.

Учитывая, что дегазация газгольдеров производится в целях подготовки к проведению газоопасных и огневых работ с допуском специализированного персонала внутрь емкости, необходимо обеспечить достижение 0 % содержания концентрации паров, а также нейтрализации отложений на внутрисменном пространстве и пирофорных соединениях [8–10].

В ходе экспериментов установлено, что переменнo-динамичные режимы характеризуются изменением (повышением) температуры и интенсификацией за счет этого концентрации паров при дегазации. Увеличение

концентрации паров, выделяемых из жидких фракций при дегазации, обусловливает на определенных этапах снижение концентрации кислорода в газовом пространстве газгольдера. А по окончании процессов полной дегазации концентрация кислорода достигает предельных значений (концентрации кислорода в атмосферном воздухе). Таким образом, изменение зависимостей концентрации кислорода позволяет учитывать этот параметр в ходе экспериментов как показатель качества дегазации, ввиду того что правилами проведения газоопасных работ регламентируется периодическое измерение кислорода в рабочей зоне проведения работ с его обязательным содержанием не ниже 19 % [10–11].

Концентрацию кислорода в газовом пространстве газгольдера можно определять, используя формулу [12–13]:

$$k_{\text{кисл}} = 0,21 \frac{p_a - p_{\text{ж}}}{p_a}, \quad (12)$$

где p_a – атмосферное давление, Па; $p_{\text{ж}}$ – давление насыщенных паров хранившейся жидкости в газгольдере, Па.

Давление насыщенных паров жидкости определяется по уравнению Антуана, или по справочным или полученным экспериментальным данным:

$$p_{\text{ж}} = 133,3 \exp^{13,3036 - \frac{3816,44}{T - 46,13}}, \quad (13)$$

где T – температура газового пространства аппарата, К.

Изменение концентрации кислорода в ходе проведения экспериментов определялось в зависимости от времени дегазации и основных этапов ее проведения. На рис. 3 представлена диаграмма изменения концентрации кислорода в зависимости от времени дегазации и ее основных этапов.

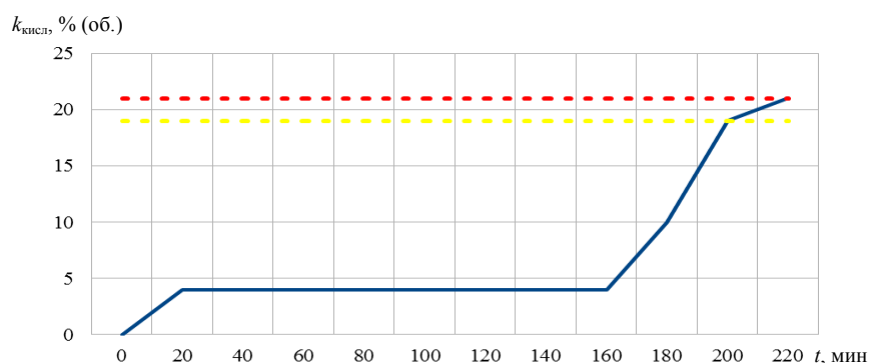


Рис. 3. Диаграмма изменения концентрации кислорода в зависимости от времени дегазации газгольдера

Fig. 3. Diagram of changes in oxygen concentration depending on the gas tank degassing time

На основании полученных данных проведенных экспериментов и выполненного анализа современных технологий и оборудования, приме-

няемых для дегазации и поддержания высокого уровня промышленной безопасности в газовой отрасли, разработано и изготовлено дегазационно-вентиляционное устройство ДВУ-ФС-1/450, вид и конструктивные элементы которого представлены на рис. 4.



Рис. 4. Вид дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450, применяемого в ходе экспериментов на газгольдере [15]

Fig. 4. View of the ДВУ-ФС [DVU-FS]-1/450 degassing and ventilation device, used during experiments on a gas tank [15]

Основные принципы, отраженные в разработанной конструкции с учетом особенностей применения и критериев обеспечения качества дегазации, следующие. В процессе дегазации газгольдера методом принудительной вентиляции используются приводные устройства – вентиляторы, оборудованные электромотором во взрывозащитном исполнении. Лопастная часть обязательно должна иметь в зоне вращения лопастей искронеобразующий корпус, зона возможного соприкосновения лопастей изготавливается из латуни или могут применяться другие не образующие искр материалы. Для подачи атмосферного воздуха в газгольдер монтируются трубопроводы, причем их конструкция выполнена из искробезопасных материалов – брезента, ПВХ материала, бельтинга и т. п. [15].

Дегазационно-вентиляционное устройство ДВУ-ФС-1/450 для дегазации газгольдера позволяет [15]:

- осуществлять фильтрацию отходящего газовоздушного потока, создаваемого установкой с учетом аспектов экологичности и снижения взрывоопасности;
- производить подачу воздуха для дегазации через специальную крышку люка газгольдера, к которому подключается ДВУ-ФС-1/450 с воздухопроводами, что обеспечивает герметичность блока подачи и поступления воздуха по воздуховоду и контролируемость технологического процесса дегазации;
- выполнять подачу атмосферного воздуха на различных скоростях, начиная с 2 м/с, так как при дегазации необходимо постепенно формировать максимальный напор (зависит от концентрации паров в газгольдере).

В ходе предварительных исследований определено, что на скорости от 1 м/с и ниже дегазация газгольдера не должна осуществляться, так как наблюдается взрывоопасная концентрация веществ в системе отвода дегазационного устройства и внутри газгольдера в зоне скопления тяжелых остатков.

ВЫВОДЫ

1. Решение проблем повышения уровня безопасности выполнения газоопасных работ, энергоэффективности и их экологичности при дегазации газгольдеров обеспечивается детальным исследованием технологического процесса дегазации с определением критериальных зависимостей, выявление которых связано с изучением вентиляционных, тепло- и массообменных процессов в зоне ведения дегазационных работ.

2. Выявлены зависимости изменения концентрации кислорода в газовом пространстве газгольдера от времени дегазации и целесообразность ее учета при определении критериев качественной оценки процесса.

3. На основании полученных зависимостей произведена оценка трех ключевых фаз процесса дегазации газгольдера из-под пропана, а также выявлены основные критерии пограничных фазовых превращений, на основе которых произведены математические расчеты и моделирование процесса дегазации с применением разработанного дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450.

ЛИТЕРАТУРА

1. О промышленной безопасности: Закон Респ. Беларусь от 5 янв. 2016 г. № 354-З // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11600354>.
2. Правила по обеспечению промышленной безопасности при добыче нефти и газа: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь от 22 нояб. 2013 г. № 55 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21328122p>.
3. Назаров, В. П. Методы и способы снижения пожаровзрывоопасности процессов дегазации нефтяных резервуаров / В. П. Назаров // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2019. № 1. С. 19–24.
4. Багманова, Р. Х. Материальные балансы химико-технологических процессов: методические указания для выполнения практических работ / Р. Х. Багманова, В. П. Дорожкин. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) «КНИТУ», 2012. 73 с.
5. Категорирование помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности: ТКП 474–2013. Минск: М-во по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 2022. 55 с.
6. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха: СН 4.02.03–2019. Взамен СНБ 4.02.01-03. Минск: Минстройархитектуры, 2025. 52 с.
7. Строительная климатология: СНБ 2.04.02–2000. Введ. 01.07.2001. Минск: Минстройархитектуры, 2001.
8. Пехота, А. Н. Автомобильные топливные заправки на предприятиях. Организация и эксплуатация: практическое пособие / А. Н. Пехота. Гомель: БелГУТ, 2014. 214 с.
9. Назаров, В. П. Теоретические основы расчета пропарки резервуаров с остатками нефтепродуктов / В. П. Назаров, Д. Ц. Ратайчук // Исследование некоторых опасных факторов пожара: сб. тр. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1985. С. 22–32.
10. Analytical Modelling of the Water Block Phenomenon in Hydraulically Fractured Wells / S. Naik, S. Yang, P. Bedrikovetsky, M. Woolley // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2019. Vol. 67. P. 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.018>
11. Burlutskii, E. An Assessment of the Effectiveness of the Analytical Methods to Fracture Propagation Control Using Accurate Mathematical Modelling / E. Burlutskii // Journal of Natural

- Gas Science and Engineering. 2019. Vol. 62. P. 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.12.017/>
12. Гориченко, С. Ф. Развитие методологии технического диагностирования трубопроводов газораспределительной системы и анализ эффективности способов восстановления их работоспособности / С. Ф. Гориченко // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2025. Т. 68, № 2. С. 154–174. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-68-2-154-174>.
 13. Фиков, А. С. Метод расчета переходных процессов в газопроводе / А. С. Фиков // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 446–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-446-458>.
 14. Пехота, Е. А. Повышение качества дегазации при подготовке газгольдеров к техническому диагностированию с применением дегазационно-вентиляционного устройства / Е. А. Пехота, В. Н. Романюк // Перспективные направления инновационного развития и подготовки кадров: сб. тез. Междунар. науч.-практ. конф., Брест, 31 окт. – 02 ноя. 2024 г. Брест: БрГТУ, 2024. Ч. 1. С. 269–275.
 15. Пехота, Е. А. Обоснование создания дегазационно-вентиляционного устройства ДВУ-ФС-1/450 с целью обеспечения качества технического диагностирования газгольдеров / Е. А. Пехота, В. Н. Романюк, А. С. Таврель // Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 17–18 окт. 2024 г. Минск: БНТУ, 2024. С. 91–94.
 16. Пехота, Е. А. Оценка и прогнозирование технического состояния стальных резервуаров, и технология их восстановления / Е. А. Пехота // Инновации в технических и экономических системах: сб. материалов VIII науч.-практ. конф. магистрантов / под общ. ред. А. А. Ерофеева. Гомель: БелГУТ, 2022. С. 71.
 17. Пехота, Е. А. Новые технологии в обеспечении эксплуатационной надежности резервуаров и экологической безопасности / Е. А. Пехота, А. А. Васильев, А. Н. Пехота // Актуальные научно-технические и экологические проблемы сохранения среды обитания. ICER-2022: сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 50-летию кафедры природоустройства, Брест, 26–28 окт. 2022 г.: в 2 ч. / редкол. А. А. Волчек [и др.]; науч. ред. А. А. Волчек, О. П. Меньшик. Брест: БрГТУ, 2022. Ч. 2. С. 170–173.

Поступила 03.04.2025 Подписана в печать 02.09.2025 Опубликовано онлайн 28.11.2025

REFERENCES

1. On Industrial Safety. Law of the Republic of Belarus dated January 5, 2016 No 354-Z. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=H11600354> (in Russian).
2. Rules for Ensuring Industrial Safety in Oil and Gas Production: approved by the Resolution of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus dated November 22, 2013 No 55. *National Legal Internet Portal of the Republic of Belarus*. Available at: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21328122p> (in Russian).
3. Nazarov V. P. (2019) Methods and Ways to Reduce the Fire and Explosion Hazard During Oil Reservoir Degassing Processes. *Pozhary i chrezvychainye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination*, (1), 19–24 (in Russian).
4. Bagmanova R. Kh., Dorozhkin V. P. (2012) *Material Balances of Chemical and Technological Processes*. Nizhnekamsk, Nizhnekamsk Chemical Technology Institute (branch) Kazan National Research Technological Universiyu (in Russian).
5. ТКР [Technical Code of Common Practice] 474-2013. *Categorization of Premises, Buildings, and Outdoor Installations According to Explosion Fire and Fire Hazard*. Minsk, Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, 2022 (in Russian).
6. SN [Standard for Construction] 4.02.03–2019. *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2025 (in Russian).

7. SNB [Construction Standards of the Republic of Belarus] 2.04.02–2000. Construction Climatology. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2001 (in Russian).
8. Pekhota A. N. (2014) *Automobile Fuel Stations at Enterprises. Organization and Operation*. Gomel, Belarusian State University of Transport, 214 (in Russian).
9. Nazarov V. P., Rataychak D. Ts. (1985) Theoretical Foundations for Calculating the Steaming of Reservoirs with Residual Oil Products. *Issledovanie nekotorykh opasnykh faktorov pozhara: sb. tr.* [Study of Some Hazardous Fire Factors: Collected Works]. Moscow, Higher Engineering Fire-Technical School of the USSR Ministry of Internal Affairs, 22–32 (in Russian).
10. Naik S., Yang S., Bedrikovetsky P., Woolley M. (2019) Analytical Modelling of the Water Block Phenomenon in Hydraulically Fractured Wells. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 67, 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2019.04.018>.
11. Burlutskii E. (2019) An Assessment of the Effectiveness of the Analytical Methods to Fracture Propagation Control Using Accurate Mathematical Modelling, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2019, 62, 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2018.12.017>.
12. Gorichenko S. F. (2025) Development of a Methodology for Technical Diagnostics of Pipelines of the Gas Distribution System and Analysis of the Effectiveness of Ways to Restore their Operability. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 68 (2), 154–174. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2026-68-2-154-174> (in Russian).
13. Fikov A. S. (2021) Method for Calculating Transients in a Gas Pipeline. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 64 (5), 446–458. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-5-446-458> (in Russian).
14. Pekhota E. A., Romanyuk V. N. (2024) Improving the Quality of Degassing in the Preparation of Gas Holders for Technical Diagnostics Using Degassing and Ventilation Device. *Perspektivnye napravleniya innovatsionnogo razvitiya i podgotovki kadrov: sb. tez. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Brest, 31 okt. – 02 noya. 2024 g. Ch. 1* [Promising Areas of Innovative Development and Personnel Training: International Scientific Practical Conference, Brest, October 31 – November 02, 2024. Part. 1]. Brest, Brest State Technical University, 269–275 (in Russian).
15. Pekhota E. A., Romanyuk V. N., Tavrel A. S. (2024) Justification for the Creation of the DVU-FS-1/450 Degassing and Ventilation Device in order to Ensure the Quality of Technical Diagnostics of Gas Holders. *Innovatsionnye tekhnologii v vodnom, kommunal'nom khozyaistve i vodnom transporte: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., Minsk, 17–18 okt. 2024 g.* [Innovative Technologies in Water, Public Utilities and Water Transport: International Scientific and Technical Conference, Minsk, October 17–18, 2024]. Minsk, Belarusian National Technical University, 91–94 (in Russian).
16. Pekhota E. A. (2022) Assessment and Forecasting of the Technical Condition of Steel Tanks, and Technology for Their Restoration. *Innovatsii v tekhnicheskikh i ekonomicheskikh sistemakh: sb. materialov VIII nauch.-prakt. konf. magistrantov* [Innovations in Technical and Economic Systems: Collection of Materials of the 8th Scientific and Practical Conference of Master's Students]. Gomel, Belarusian State University of Transport, 71 (in Russian).
17. Pekhota E. A., Vasilyev A. A., Pekhota A. N. (2022) New Technologies to Ensure Operational Reliability of Tanks and Environmental Safety. *Aktual'nye nauchno-tekhnicheskie i ekologicheskie problemy sokhraneniya sredy obitaniya. ICEP – 2022: sb. tr. V Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., posvyashch. 50-letiyu kafedry prirodoustroistva, Brest, 26–28 okt. 2022 g. Ch. 2.* [Current Scientific, Technical and Environmental Issues of Habitat Conservation. Collected Works of the 5th International Scientific and Practical Conference, dedicated to the 50th Anniversary of the Department of Nature Management, Brest, October 26–28, 2022. Part 2]. Brest, Brest State Technical University, 170–173 (in Russian).