

А.А. Бородин

(Уральский институт ГПС МЧС России; e-mail: nskborodin@gmail.com)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЛЕГМАТИЗАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ДЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Приведены результаты экспериментального исследования процесса флегматизации азотом горизонтальных резервуаров для нефтепродуктов на лабораторном стенде.

Ключевые слова: флегматизация, огневые работы, инертный газ, азот.

A.A. Borodin

EXPERIMENTAL STUDY OF OXYGEN REDUCTION OF HORIZONTAL TANKS FOR PETROLEUM PRODUCTS

It is represented the results of experimental studies of oxygen reduction by nitrogen from horizontal tanks for petroleum products on a laboratory bench.

Key words: oxygen reduction, hot works, an inert gas, nitrogen.

В ходе подготовки и проведения огневых ремонтных работ на резервуарах для нефти и нефтепродуктов необходимо предусматривать выполнение мероприятий, обеспечивающих пожаровзрывобезопасность процесса. К числу таковых относятся различные способы механической очистки, вентилирование, пропаривание и т.п. Указанные способы предполагают полное удаление жидкого нефтепродукта и его отложений на стенках резервуаров, что, несомненно, является достаточно сложной и трудоемкой задачей. Вместе с тем, флегматизация резервуара, освобожденного только от жидкой фазы нефтепродукта, позволит существенно снизить материальные потери, связанные с выводом резервуаров из нормального технологического процесса при условии обеспечения пожаровзрывобезопасности.

Наиболее существенный недостаток способа флегматизации – необходимость постоянного хранения запаса инертного газа – устраняется применением мембранных воздухоразделительных систем, обеспечивающих получение инертной среды (азота) путем фильтрования атмосферного воздуха. Поскольку стоимость мембранной установки прямо пропорциональна её производительности по инертному газу, то целесообразно минимизировать требуемый расход при условии обеспечения пожаровзрывобезопасности.

Условием безопасности в данном случае является создание во всем защищаемом объеме среды с содержанием кислорода не выше безопасного значения. Однако, проведение измерений концентрации в различных точках ремонтируемого резервуара, в том числе на уровне дна, технически сложно. В связи с этим возник вопрос о проведении экспериментального исследования процесса флегматизации горизонтального резервуара с целью определения степени неравномерности распределения азота мембранного разделения и, соот-

ветственно, кислорода в объёме резервуара при небольшой кратности продувки. Данный процесс ранее был изучен только для вертикальных резервуаров [1, 2], тогда как технология флегматизации может быть применена и на горизонтальных резервуарах для нефтепродуктов, в том числе, резервуарах автозаправочных станций.

При разработке лабораторной установки (рис. 1) руководствовались методом приближенного моделирования, который, в свою очередь, основан на теории подобия [3, 4]. За основу при подготовке к проведению экспериментального исследования были приняты работы Назарова В.П. [5-10], так как в них рассматриваются вопросы вентиляции и флегматизации емкостных аппаратов с остатками нефтепродуктов.

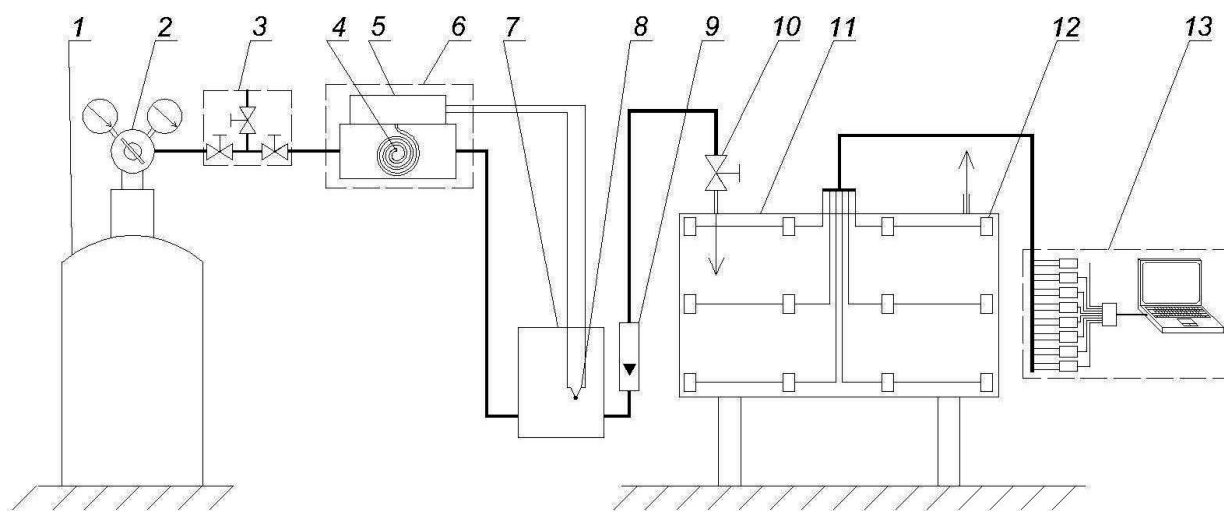


Рис. 1. Схема лабораторной установки:

- 1 – ёмкость со сжатым азотом; 2 – газовый редуктор; 3 – вентили точной подстройки;
- 4 – нагревательный элемент; 5 – блок автоматической регулировки температуры;
- 6 – канальный воздушнонагреватель; 7 – контрольная емкость; 8 – термопара;
- 9 – ротаметр; 10 – шаровый кран; 11 – экспериментальный резервуар;
- 12 – датчики концентрации кислорода; 13 – контрольно-измерительный комплекс

Основными элементами установки являлись:

- экспериментальный резервуар объёмом $0,05 \text{ м}^3$, геометрически подобный РГЦ-25;
- система подачи инертного газа;
- контрольно-измерительный комплекс, обеспечивающий измерение концентраций кислорода в нескольких точках.

Для лабораторных экспериментов вместо азота мембранного разделения, содержащего небольшое остаточное количество кислорода, использовался сжатый газообразный азот, который перед подачей в резервуар проходил предварительный подогрев до фиксированной температуры с целью приближения к свойствам азота, получаемого мембранным способом.

Контрольно-измерительный комплекс представляет собой универсальную метрологическую систему, предназначенную для сбора, регистрации и обработки показаний датчиков газового анализа. В систему входят: персональный компьютер; модуль сбора данных на шине USB 2.0 АЦП ЦАП ZET 210; предварительные усилители сигналов ZET 410; датчики газового анализа.

В объёме экспериментального резервуара закрепляются датчики концентраций кислорода. Схема расстановки датчиков приведена на рис. 2.

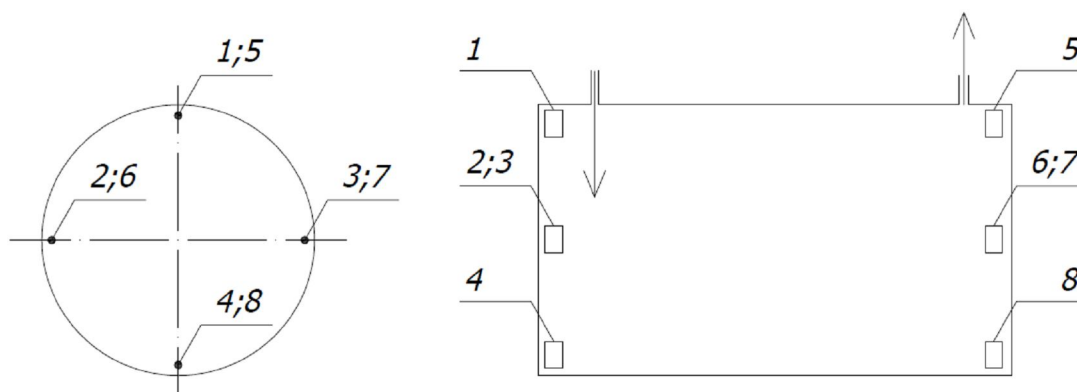


Рис. 2. Схема размещения датчиков в объёме экспериментального резервуара:
1-8 – номера датчиков концентрации кислорода

Эксперимент проводится для трех различных расходов азота: 0,02, 0,13 и 0,17 $\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$, что удовлетворяет условиям проведения флегматизации на реальных объектах.

Таблица 1

Программа испытаний на лабораторном стенде

№	Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Кратность продувки, 1/ч	Диаметр отверстия, мм	Re	Количество экспериментов
1	0,02	0,4	0,3	1325*	3
2	0,13	2,6	0,6	8613	3
3	0,17	3,4	0,6	11264	3

* конструктивно обеспечить соблюдение требуемого числа Re (более 2300) не представляется возможным, однако, продувка со столь небольшой кратностью необходима с целью максимального приближения условий флегматизации к реальным

Подача инертного газа осуществляется в верхнюю часть экспериментального резервуара. Отверстие для подачи инертного газа формирует струю, параллельную боковой стенке и направленную вертикально вниз.

Для измерения концентрации кислорода использовались электрохимические преобразователи концентрации кислорода. Диапазон измеряемой концентрации составляет от 0 % до 21 %, следовательно, удовлетворяет условиям проведения экспериментальных исследований.

Объём полученных экспериментальных данных чрезвычайно велик, по результатам девяти экспериментов (по 3 эксперимента на каждую из кратностей продувки) количество экспериментальных значений концентраций, под-

вергнутых анализу, составило более 600 тыс. Фиксация текущей концентрации с высокой частотой (приблизительно через каждые 0,4 с) позволила исключить "случайные" колебания состава контролируемой смеси в локальном объёме, что возможно в случае отбора проб на газовый анализ с помощью шприца.

По результатам экспериментов получены графики изменения концентраций кислорода в различных точках экспериментального резервуара. Поскольку в некоторых из них получились близкие значения, то в целях повышения информативности на рис. 3-5 они сгруппированы.

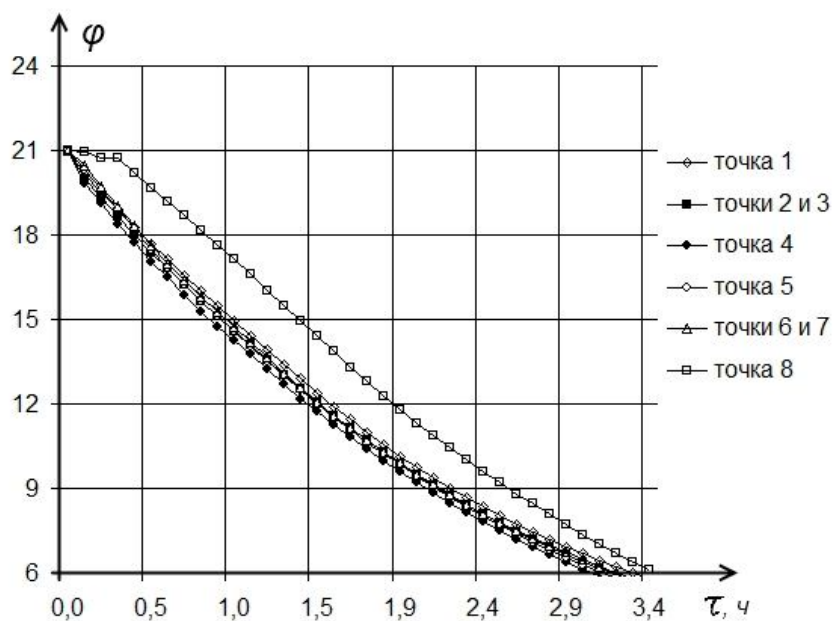


Рис. 3. Динамика концентраций кислорода в различных точках резервуара в ходе флегматизации с кратностью продувки 0,4 1/ч

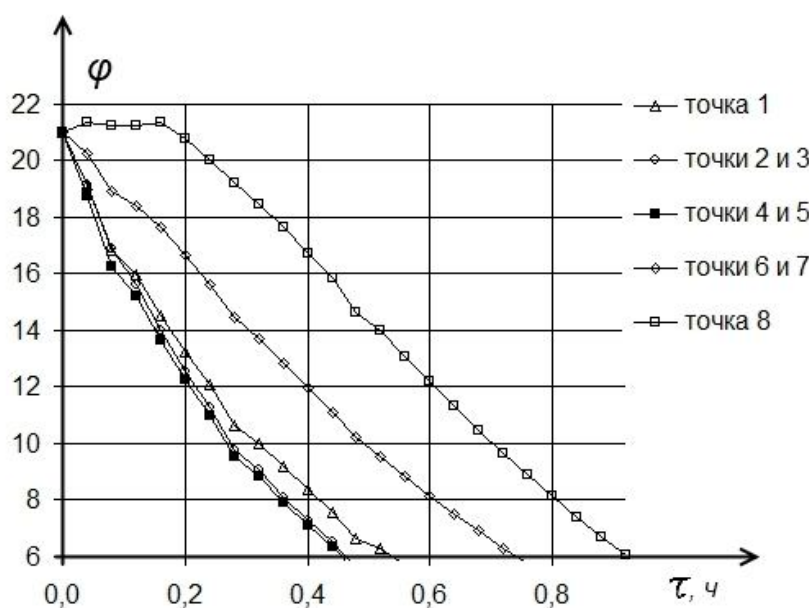


Рис. 4. Динамика концентраций кислорода в различных точках резервуара в ходе флегматизации с кратностью продувки 2,6 1/ч

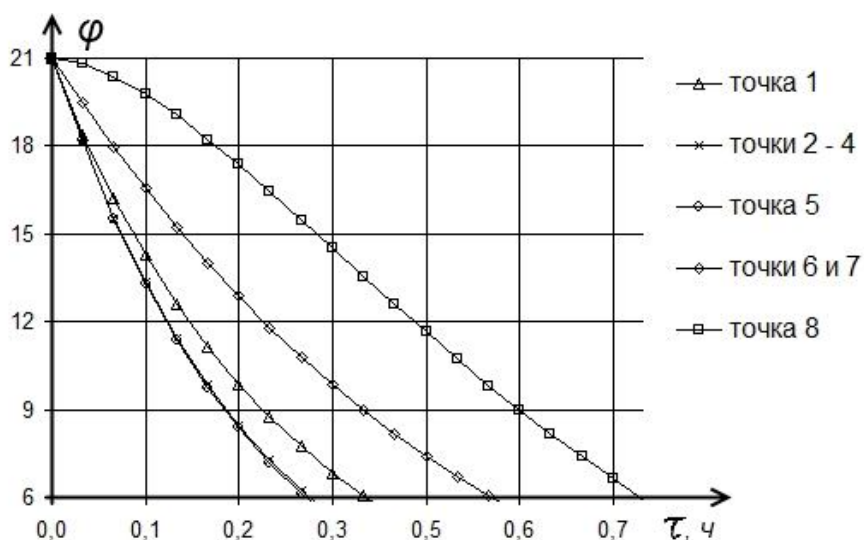


Рис. 5. Динамика концентраций кислорода в различных точках резервуара в ходе флегматизации с кратностью продувки 3,4 1/ч

Для проведения математического анализа определим величину относительной концентрации для каждой точки в каждый момент времени. При этом величина относительной концентрации будет определяться формулой:

$$\varphi_{отнi} = \frac{\varphi_i}{\varphi_{ср}}, \quad (1)$$

где φ_i – концентрация кислорода в i -й точке в любой момент времени, % об.;
 $\varphi_{ср}$ – среднеобъёмная концентрация кислорода в защищаемом резервуаре в соответствующий момент времени, % об.

На рис. 6-8 приведена динамика относительных концентраций для различных кратностей продувки.

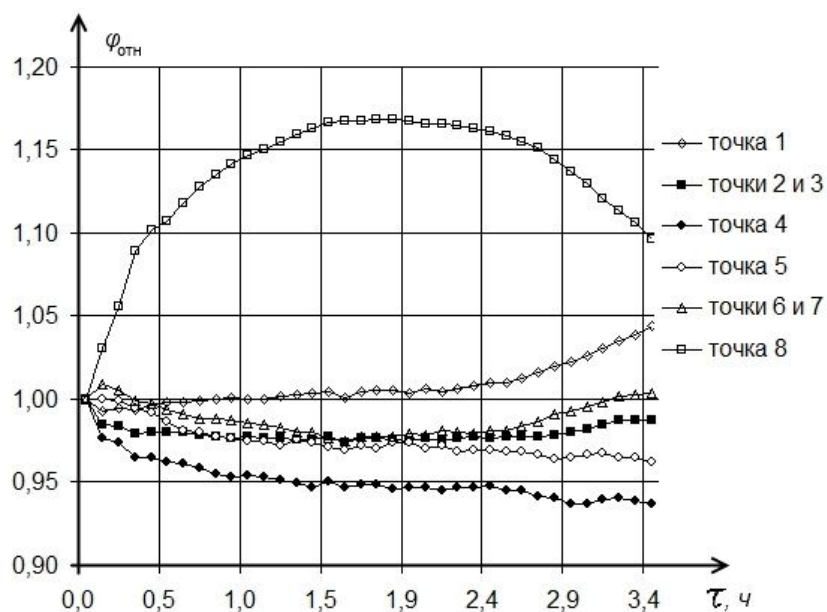


Рис. 6. Изменения относительных концентраций в ходе флегматизации с кратностью продувки 0,4 1/ч

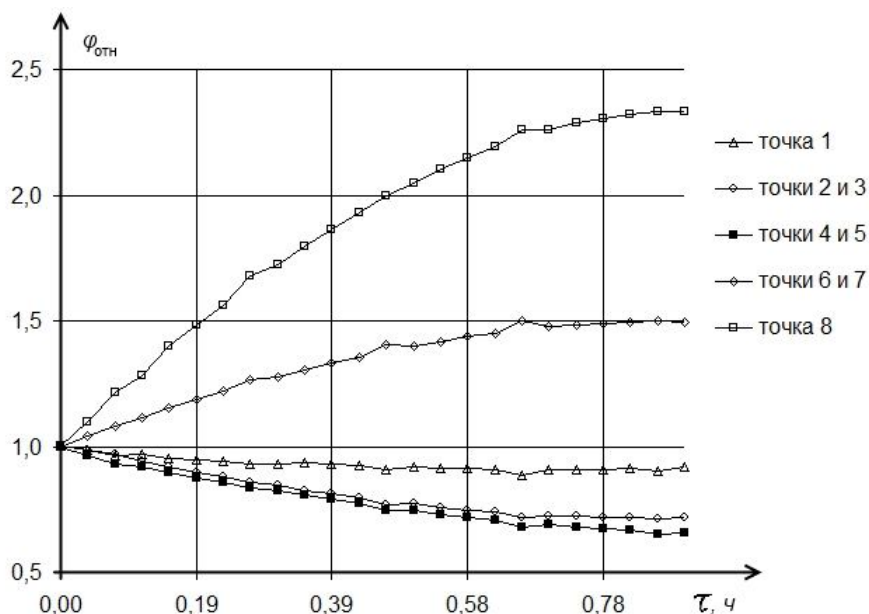


Рис. 7. Изменения относительных концентраций в ходе флегматизации с кратностью продувки 2,6 1/ч

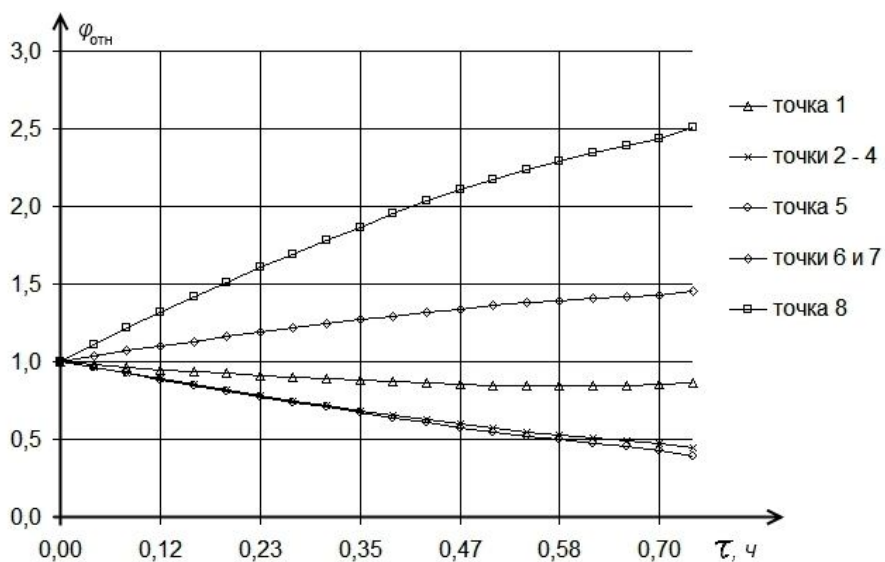


Рис. 8. Изменения относительных концентраций в ходе флегматизации с кратностью продувки 3,4 1/ч

Полученные данные говорят о том, что допущение о полном и мгновенном перемешивании поступающего инертного газа не соответствует действительности. В общем виде зависимость параметра $\varphi_{отн}$ от времени можно представить в виде графика (рис. 9).

На определенном этапе расхождение между концентрациями в различных точках достигает максимального значения, но при $\tau \rightarrow \infty$ параметр $\varphi_{отн} \rightarrow 1$, что наблюдается на рис. 6. Схожая специфика распределения концентраций наблюдалась для кратностей продувки 2,6 1/ч и 3,4 1/ч, а также для кратности 0,4 1/ч приблизительно в течение первых двух часов продувки. Таким образом, безопасная концентрация кислорода при кратности продувки 0,4 1/ч достигает-

ся при условии существенно меньшей неравномерности распределения концентраций, по сравнению с кратностями 2,6 1/ч и 3,4 1/ч, что говорит о целесообразности подачи инертного газа с меньшим расходом, способствующим более равномерному его распределению.

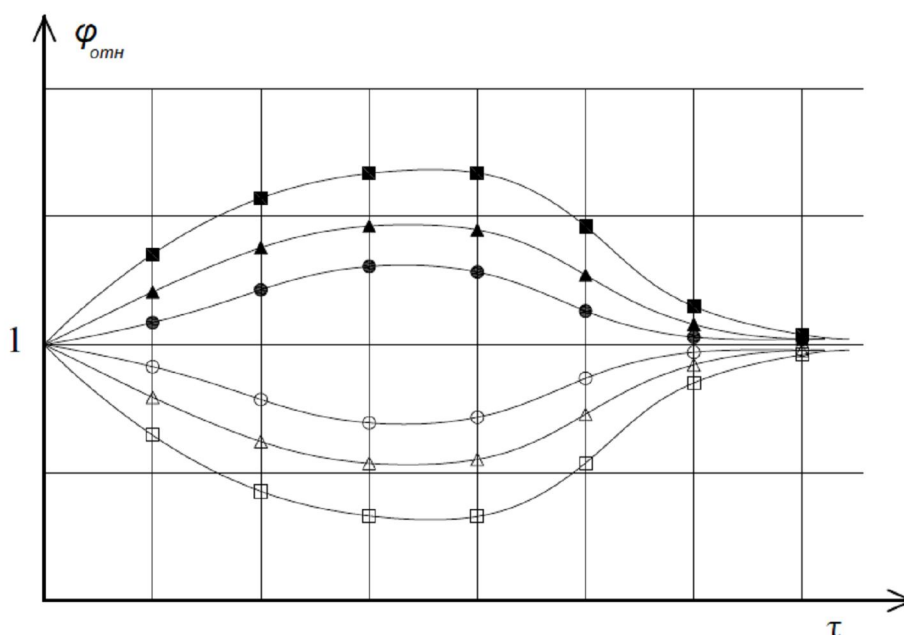


Рис. 9. Общий вид изменений относительных концентраций в ходе флегматизации

Произведём сравнение полученных экспериментальных и расчётных данных. При проведении расчётов за основу примем математическую зависимость, основанную на среднеобъёмных параметрах, подробно описанную в работе [7], в которой для расчёта времени флегматизации используется формула:

$$\tau = \frac{V}{q} \ln \frac{\varphi_{вх} - \varphi_0}{\varphi_{вх} - \varphi_{ин}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{вх}$ — концентрация флегматизатора в подаваемой в защищаемый объём инертной среде, *об. доли*;

φ_0 — начальная концентрация флегматизатора в защищаемом объёме, *об. доли*;

$\varphi_{ин}$ — безопасная концентрация инертного газа, *об. доли*.

Необходимо отметить, что экспериментальное время флегматизации определялось по достижении безопасных значений среднеобъёмной концентрацией (τ_ϕ) и максимальной концентрацией во всем объёме резервуара ($\tau_{общ}$), в то время, как расчётным путем определяется время флегматизации только по среднеобъёмным параметрам.

Анализ данных, приведенных в табл. 2, позволяет сделать вывод о недостаточной адекватности применяемой математической модели и необходимости её корректировки, в особенности это касается времени флегматизации всего объёма защищаемого резервуара с учётом неравномерного распределения концентраций ($\tau_{общ}$).

Сравнение экспериментальных и расчётных данных

Кратность продувки, 1/ч	Экспериментальные данные		Математическая модель		Относительная погрешность, %	
	$\tau_{ф}$	$\tau_{общ}$	$\tau_{ф}$	$\tau_{общ}$	$\tau_{ф}$	$\tau_{общ}$
0,4	3,212	3,4	3,132	3,132	2,49	7,89
2,6	0,56	0,897	0,482	0,482	13,96	46,28
3,4	0,439	0,74	0,368	0,368	16,07	50,21

Таким образом, было установлено, что принятое допущение о равномерном распределении концентраций далеко не соответствует действительности, среднеобъёмная концентрация кислорода отличается от концентрации кислорода в удаляемой из резервуара среде. Следовательно, необходимо совершенствование математического аппарата, позволяющего определить время флегматизации в зависимости от кратности продувки резервуара, а также обеспечить пожаровзрывобезопасность среды, не прибегая к многоточечному контролю концентраций внутри резервуара.

Выводы

Проведённое экспериментальное исследование позволило выявить неравномерность распределения инертного газа и кислорода в процессе флегматизации горизонтальных резервуаров, что опровергает принятое для рассматриваемого процесса допущение о равномерном перемешивании инертной среды. В целях более детального исследования процесса замещения парогазовой среды инертным газом в горизонтальных резервуарах целесообразно проведение экспериментов на геометрически подобных емкостях различного масштаба, применяя различные схемы продувки.

Полученные в работе экспериментальные данные могут быть распространены на системы флегматизации, основанные как на применении запаса газообразного азота, так и на базе мембранных воздухоразделительных установок.

Литература

1. *Назаров В.П., Корнилов А.А.* Экспериментальное исследование процесса флегматизации резервуаров для нефтепродуктов азотом мембранного разделения // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности". Вып. 4 (32). 2010. 9 с. <http://ipb.mos.ru/ttb/2010-4>.
2. *Корнилов А.А.* Экспериментальное исследование неравномерности распределения азота в процессе флегматизации резервуаров для нефтепродуктов // Интернет-журнал "Технологии техносферной безопасности". Вып. 1 (41). 2012. 8 с. <http://ipb.mos.ru/ttb/2012-1>.
3. *Кирпичев М.В.* Теория подобия. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 162 с.
4. *Гухман А.А.* Физические основы теплопередачи. Л., М.: Энергоиздат, 1934. 315 с.
5. *Назаров В.П.* Пожаровзрывобезопасность предремонтной подготовки и проведения огневых работ на резервуарах: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: ВИПТШ МВД России, 1995. 444 с.

6. **Назаров В.П.** Очистка резервуаров от остатков светлых нефтепродуктов перед проведением огневых ремонтных работ: Дис. ... канд. техн. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. 250 с.

7. **Булгаков В.В.** Обеспечение пожаровзрывобезопасности огневых аварийно-ремонтных работ на резервуарах способом флегматизации: Дис. ... канд. техн. наук. М.: Академия ГПС МВД России, 2001. 220 с.

8. **Сорокоумов В.П.** Обеспечение пожарной безопасности резервуаров с локальными остатками нефтепродуктов при проведении аварийно-ремонтных работ: Дис. ... канд. техн. наук. – М.: Академии ГПС МЧС России, 2002. 160 с.

9. **Назаров В.П., Корнилов А.А., Зыков П.И.** Разработка экспериментальной установки по изучению процессов флегматизации инертными газами резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 4. С. 50-55.

10. **Назаров В.П., Корнилов А.А., Зыков П.И.** Расчётное обоснование методики и конструктивных особенностей экспериментальной установки по изучению процессов флегматизации резервуаров для нефти и нефтепродуктов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2009. № 4. С. 55-60.

Статья опубликована 21 декабря 2012 г.