

В.П. Назаров, А.А. Корнилов
(Академия Государственной противопожарной службы МЧС России;
e-mail: kornilov_alexei1@mail.ru)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЛЕГМАТИЗАЦИИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ АЗОТОМ МЕМБРАННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ

Аннотация. Приведены результаты проведённого авторами экспериментального исследования процесса флегматизации резервуаров для нефтепродуктов азотом мембранного разделения.

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

V.P. Nazarov, A.A. Kornilov

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PROCESS PHLEGMATIZATION TANKS FOR MINERAL OIL OBTAINED BY MEMBRANE SEPARATION OF AIR NITROGEN

Abstract. Results experimental and process researches phlegmatization tanks for mineral oil by membrane separation of air nitrogen resulted.

Key words: phlegmatization, hot works, inert gas, nitrogen.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 11 июля 2010 г.

Вопросы обеспечения пожаровзрывобезопасности резервуаров нефтегазового комплекса в настоящее время продолжают оставаться актуальными, о чём свидетельствуют регулярно происходящие взрывы и пожары как в ходе нормальной эксплуатации, так и в период проведения регламентных ремонтных работ. Это говорит о том, что реализуемые на сегодняшний системы и средства обеспечения пожаровзрывобезопасности не лишены недостатков и требуют постоянной модернизации.

Одним из перспективных направлений обеспечения пожаровзрывобезопасности емкостного оборудования является флегматизация парогазовой среды и поддержание безопасной концентрации кислорода в надтопливном пространстве. В Академии ГПС МЧС России с целью совершенствования указанного выше способа на стадии огневых ремонтных работ проводятся исследования процессов флегматизации резервуаров для нефти и нефтепродуктов.

Известны различные способы флегматизации и виды флегматизаторов, достоинства и недостатки которых достаточно широко освещены в научной и технической литературе. В настоящей статье представлены некоторые результаты исследования способа флегматизации с использованием азота, полученного мембранным разделением воздуха. Инертный газ, получаемый мембранным способом, по существу представляет собой обогащенный азотом воздух (или обедненный кислородом воздух). Данный способ имеет ряд особенностей, который отличает его от прочих известных способов флегматизации:

- получаемый с помощью мембранных установок азот имеет температуру на 5-7 °С выше, чем температура воздуха, поступающего в воздухоразделительные мембраны;

- азот подается под небольшим избыточным давлением (порядка 0,02-0,05 МПа), что обусловлено как особенностями технологического исполнения мембранных воздухоразделительных установок, так и необходимостью поддержания в свободном пространстве резервуара минимального избыточного давления;

- при соблюдении условия герметичности внутреннего пространства резервуара флегматизация парогазовой среды происходит за счет перемешивания (диффузии) подаваемого внутрь азота с парами нефтепродуктов и воздухом;

- концентрация азота в подаваемой инертной среде варьируется в зависимости от характеристик используемой мембранной установки, её производительности, индивидуальных настроек.

Для проведения исследований авторами были разработаны экспериментальный стенд и измерительный комплекс, которые позволяют моделировать рассматриваемые способы флегматизации и производить замеры необходимых параметров.

При разработке стенда был использован метод приближенного моделирования, который, в свою очередь, основывается на общей теории подобия, в разработке которой ведущая роль принадлежит отечественной науке [1, 2].

При моделировании исследуемых процессов, соблюдались следующие условия, которые отмечаются в работах [3, 4]:

- геометрическое подобие модели и натуре;
- Re_n в турбулентной области, т.е. $Re_n > 2300$;
- равенство чисел подобия в модели и натуре.

В качестве определяющего числа подобия принято число Гомохронности H_O . Комплекс H_O является наиболее приемлемым для процесса интенсивного уменьшения концентраций:

$$H_O = \frac{u \cdot \tau}{l} = idem,$$

где u – скорость в потоке газа, $m \cdot c^{-1}$;

τ – время, c ;

l – характерный линейный размер, m .

Из равенства чисел Гомохронности в модели и натуре при τ_m и τ_n следует:

$$\frac{u_m}{u_n} = \frac{l_m}{l_n} = m.$$

Геометрическое подобие предполагает следующее соотношение:

$$\frac{q_m}{q_n} = \left(\frac{f_m^n}{f_n^n} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{q_m}{q_n} \right)^{\frac{1}{3}} = m.$$

где f_n – площадь приточного отверстия, m^2 ;

q – расход инертного газа, $m^3 \cdot c^{-1}$.

Скорость притока инертного газа связана с расходом q , кратностью Kp и энергией притока ε_n следующими соотношениями:

$$q = f_{\text{п}} \cdot u_n,$$

$$Kp = \frac{q}{V} = \frac{f_{\text{п}} \cdot u_n}{V},$$

$$\varepsilon_n = Kp \frac{u_n^2}{2} = \frac{f_{\text{п}} \cdot u_n^3}{2 \cdot V}.$$

Учитывая эти соотношения и условие геометрического подобия, получим зависимости:

$$q_{\text{м}} = q_{\text{п}} \cdot m^3,$$

$$Kp_{\text{м}} = Kp_{\text{н}},$$

$$\varepsilon_{\text{н}}^{\text{м}} = \varepsilon_{\text{н}}^{\text{н}} \cdot m^2.$$

Пользуясь опытом конструирования экспериментальных установок для исследования протекающих процессов массообмена [3, 4, 5], разработка экспериментального резервуара (ЭР) основывалась на теории подобия с вертикальным резервуаром РВС-5000 с объёмом 5000 м^3 . В табл. 1 приведены технические характеристики и геометрические размеры ЭР.

Таблица 1

Основные характеристики экспериментального резервуара ЭР-1	
Геометрические размеры:	Масштаб 1:30
Диаметр, м	0,7
Высота, м	0,5
Площадь дна, м^2	0,385
Объем, м^3	0,192

Принципиальная схема ЭС показана на рис. 1.

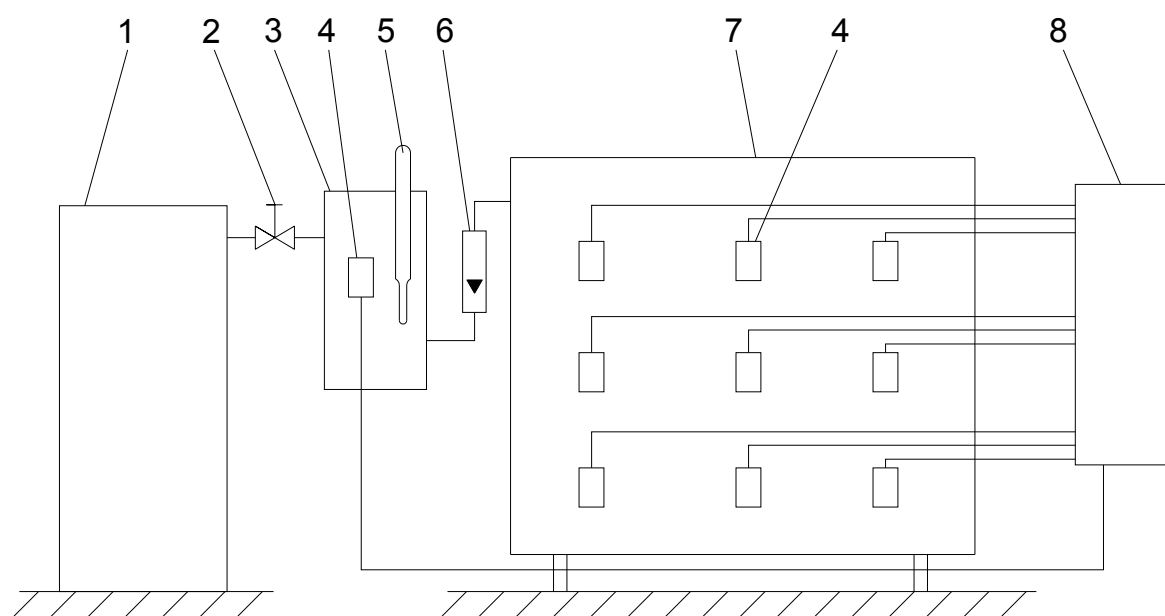


Рис. 1. Принципиальная схема ЭС-1:

1 – мембранный модуль; 2 – вентиль; 3 – контрольная емкость; 4- датчики кислорода; 5 – термометр; 6 – ротаметр; 7 – ЭР; 8 – контрольно-измерительный комплекс

Схема размещения кислородных сенсоров в объеме экспериментального резервуара показана на рис. 2.

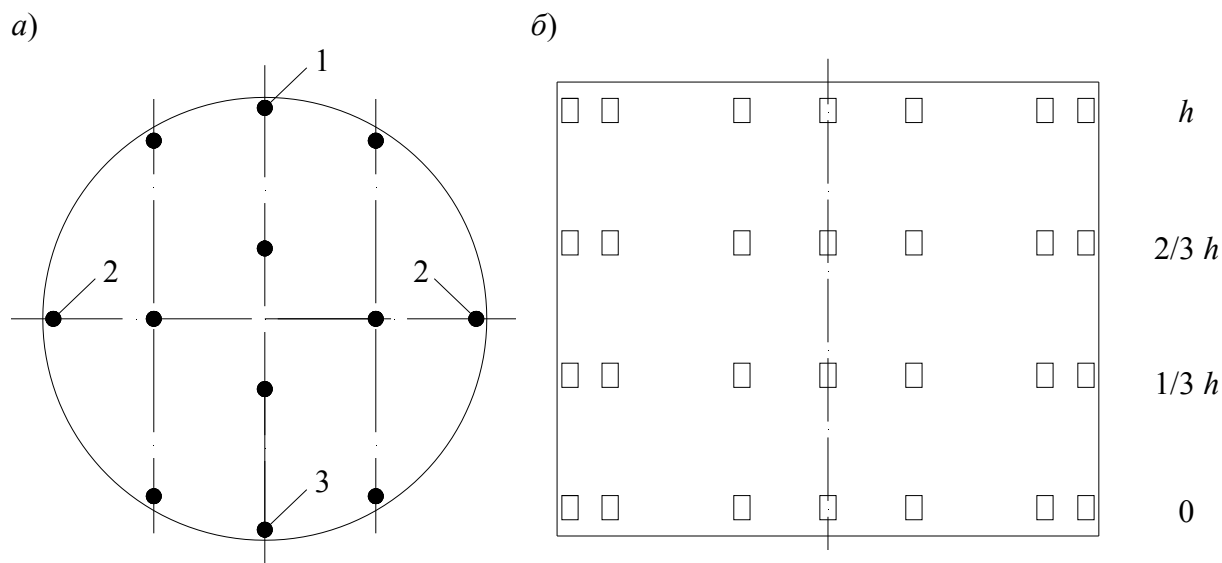


Рис. 2. Схема размещения сенсоров в объеме экспериментального резервуара:
a – вид сверху; *б* – вид сбоку;
 1, 2, 3 – опорные точки для проведения анализа
 неравномерности распределения кислорода

Подача инертного газа осуществлялась на 4 уровне в непосредственной близости от точки 3 на рис. 2*a*, струя направлена параллельно основанию вдоль его диаметра. Выпускное отверстие находилось в точке 1 на уровне 1.

Основной особенностью данной лабораторной установки является применение серийно выпускаемого мембранного модуля OxyReduct. Основным элементом ЭС-1 служит ЭР (7), изготовленный из органического стекла толщиной 3 мм. На крыше ЭР установлено три штуцера для ввода проводов измерительных сенсоров, трубок для подачи удаления инертного газа. Предусмотрена установка так называемой контрольной емкости (3), которая выполнена из стекла и герметизирована. В ней размещены приборы контроля температуры (5) и концентрации кислорода (4). Она предназначена для осуществления контроля основных параметров подаваемой инертной среды. Ротаметр (6) устанавливается на линии подачи инертного газа непосредственно перед резервуаром, чтобы исключить погрешность, которая может возникнуть в случае недостаточной герметичности линии подачи. Инертную среду (обедненный кислородом воздух) получаем из мембранного модуля (1). Данные сенсоров поступают в контрольно-измерительный комплекс (8).

Оценка характера рассеивания инертного газа в объеме экспериментального резервуара производилась в зависимости от неравномерности распределения концентрации кислорода.

Кроме измерения концентрации кислорода, производились замеры температуры:

- удаляемой из резервуара газовой смеси;
- на поверхности крыши резервуара с внешней стороны;

- на поверхности верхнего пояса резервуара с внешней стороны;
- на поверхности нижнего пояса резервуара с внешней стороны;
- дна резервуара с внешней стороны.

Измерения производились с помощью лабораторных термометров, а также инфракрасного термометра "Кельвин", предназначенного для бесконтактного измерения температуры поверхности.

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

Принцип работы контрольно-измерительного комплекса обеспечивает полную автономность процесса сбора и регистрации необходимых параметров при проведении эксперимента с использованием первичных преобразователей. Сигнал с первичного преобразователя поступает по проводам на предварительный усилитель ZET 410. После усиления поступающего сигнала ZET 410 передает его на измерительный прибор – модуль АЦП ЦАП ZET 210. Модуль АЦП ЦАП ZET 210 предназначен для измерений параметров сигналов в широком частотном диапазоне (с частотой дискретизации до 500 кГц), поступающих с различных первичных преобразователей. Управление модулем осуществляется при помощи программного обеспечения ZETLab, которое позволяет проводить полную визуализации протекающих процессов, осуществлять спектральный анализ, измерять электрические параметры, производить генерацию, записывать и воспроизводить сигналы, поступающие на входные каналы ZET 210.

Данный контрольно-измерительный комплекс позволяет осуществить высокую оптимизацию экспериментального исследования и получить ожидаемую результативность.

Минимальная кратность, с которой производилась подача инертного газа, составляет 0,313 1/ч. Под кратностью в данном случае понимается отношение:

$$Kp = \frac{q}{V},$$

где q – расход инертного газа, m^3/c ;
 V – объем экспериментальной емкости, m^3 .

В результате экспериментального исследования были получены данные по неравномерности распределения концентрации кислорода в ходе флегматизации.

Используемое измерительное оборудование многократно фиксирует показания сенсоров, в результате чего по каждому из них за один эксперимент было получено до 12 тыс. значений. Общий вид кривой снижения концентрации кислорода для каждого сенсора представлен на рис. 3. В результате экспериментального исследования было получено большое количество данных, позволяющих провести детальный анализ процесса. В увеличенном фрагменте на рис. 3 можно увидеть колебания концентрации кислорода и визуально оценить степень детализации измерительных операций.

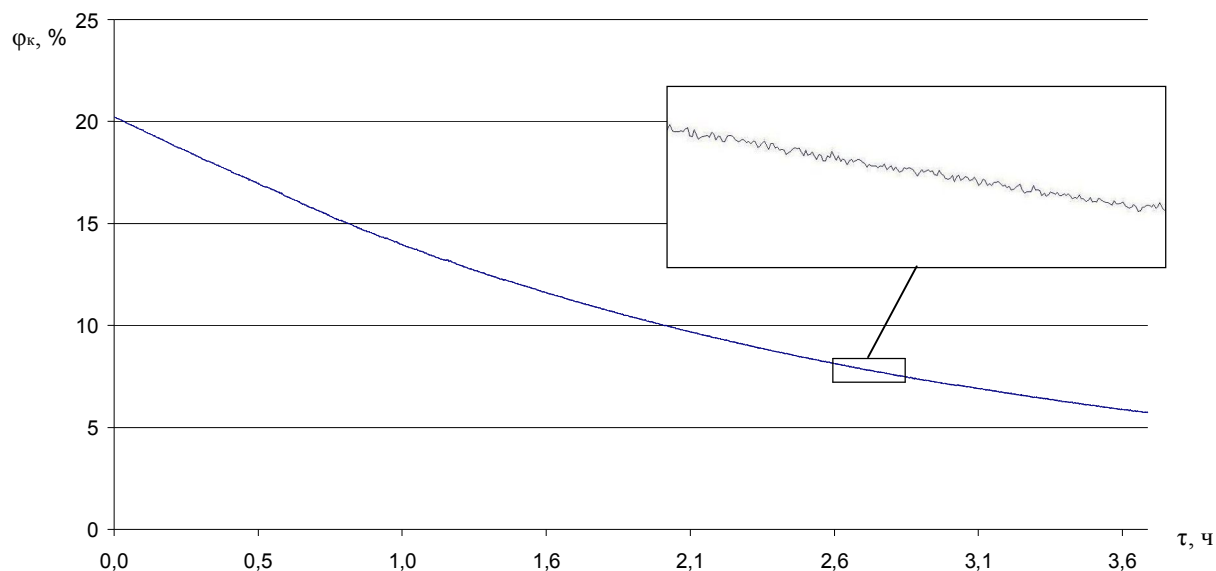


Рис. 3. Общий вид кривой снижения концентрации кислорода, построенной по экспериментальным данным

В ходе эксперимента были получены сведения об изменении концентрации кислорода в процессе флегматизации, на основании которых можно судить о неравномерности распределении кислорода в объеме защищаемой емкости. Приведенная выше схема размещения сенсоров позволила произвести оценку по следующим позициям:

- распределение концентрации кислорода по высоте резервуара (рис. 4-7);
- отношение среднеобъемной концентрации кислорода к концентрациям в опорных точках, указанных на рис. 2.

Изменение концентрации по высоте резервуара позволяет судить об общей тенденции процесса перемешивания, учитывая, что подача осуществляется в нижней части емкости.

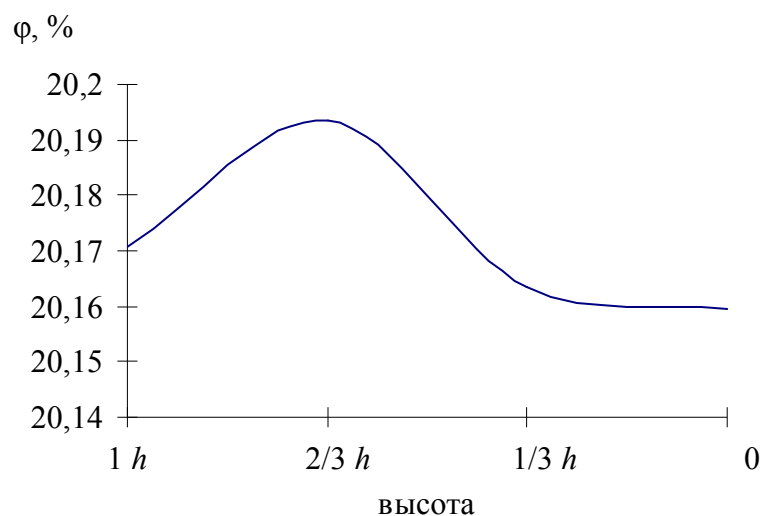


Рис. 4. График распределения концентрации кислорода в начальный момент флегматизации

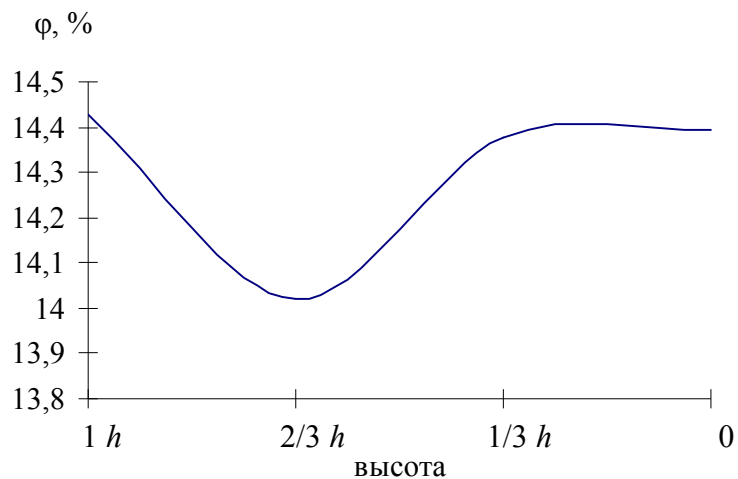


Рис. 5. График распределения концентрации кислорода через час после начала флегматизации

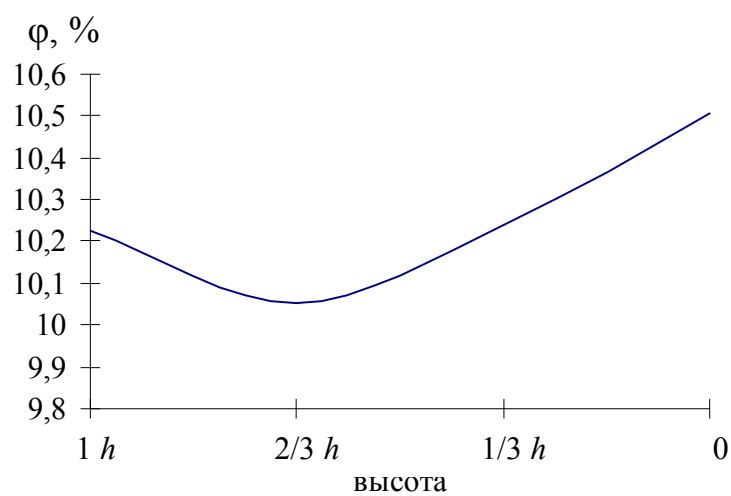


Рис. 6. График распределения концентрации кислорода через 2 часа после начала флегматизации

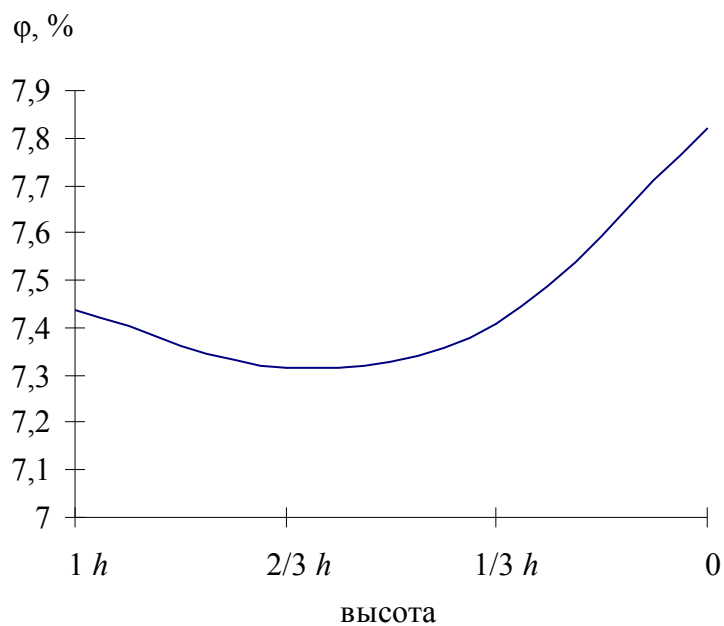


Рис. 7. График распределения концентрации кислорода через 3 часа после начала флегматизации

Полученные зависимости свидетельствуют о том, что рассеивание происходит относительно равномерно. Различия составляют несколько десятых процента. В то же время содержание кислорода в верхней части емкости больше, что опровергает мнение о свойствах азота "мгновенно" перемешиваться с воздухом в защищаемой среде. Следовательно, контроль парогазовой среды целесообразно производить в верхней части резервуара.

Одной из основных задач, помимо выявления специфики рассеивания инертного газа, было выявление участков емкости, в которых концентрация кислорода отличается от среднеобъемной. Для рассматриваемого процесса характерно наличие как зон интенсивного перемешивания, так и "застойных" областей, где циркуляция происходит в меньшей степени из-за удаленности от струй газа. В качестве опорных были выбраны наиболее удаленные от места подачи точки (они указаны на рис. 3 как опорные) с учётом размещения по высоте емкости.

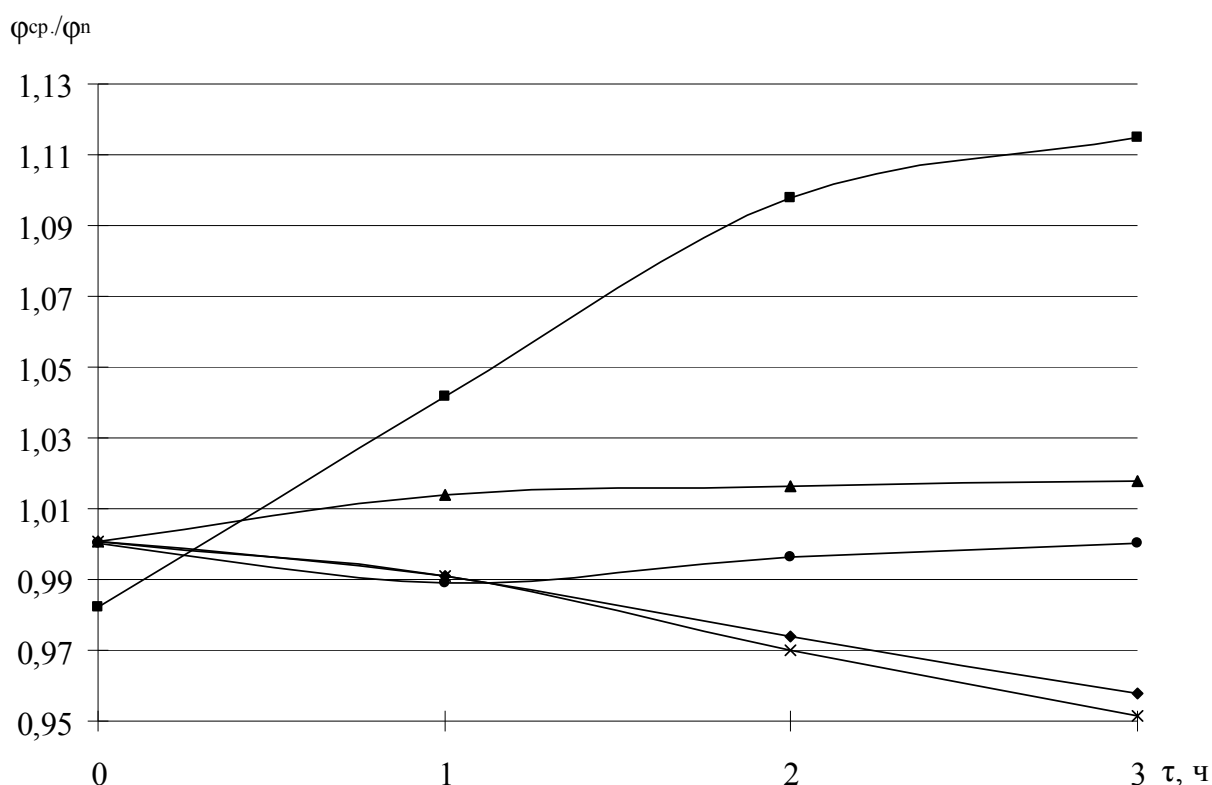


Рис. 8. Отношение концентраций кислорода в опорных точках к среднеобъемной концентрации в резервуаре в ходе флегматизации:

- - отношение концентрации кислорода в точке 2 на уровне 4 к среднеобъемной концентрации в резервуаре;
- ◆— - отношение концентрации кислорода в точке 1 на уровне 4 к среднеобъемной концентрации в резервуаре;
- ▲— - отношение концентрации кислорода в точке 2 на уровне 1 к среднеобъемной концентрации в резервуаре;
- ×— - отношение концентрации кислорода в точке 3 на уровне 4 к среднеобъемной концентрации в резервуаре;
- - отношение концентрации кислорода в точке 3 на уровне 1 к среднеобъемной концентрации в резервуаре в ходе флегматизации

Таким образом, в нижней части емкости в большей степени заметна неравномерность рассеивания инертного газа, что обусловлено его физическими свойствами (легче воздуха) и способом подачи (струя направлена вдоль диаметра параллельно основанию).

Столь подробное описание приведено для расхода, который наиболее близок к тому (с учетом подобия), который устанавливается на системах флегматизации по защите функционирующих ныне резервуаров.

Кроме измерения концентрации кислорода осуществлялся контроль температуры подаваемого внутрь инертного газа, удаляемой газовой среды и температуры на поверхности корпуса резервуара.

Результаты измерений представлены на рис. 9.

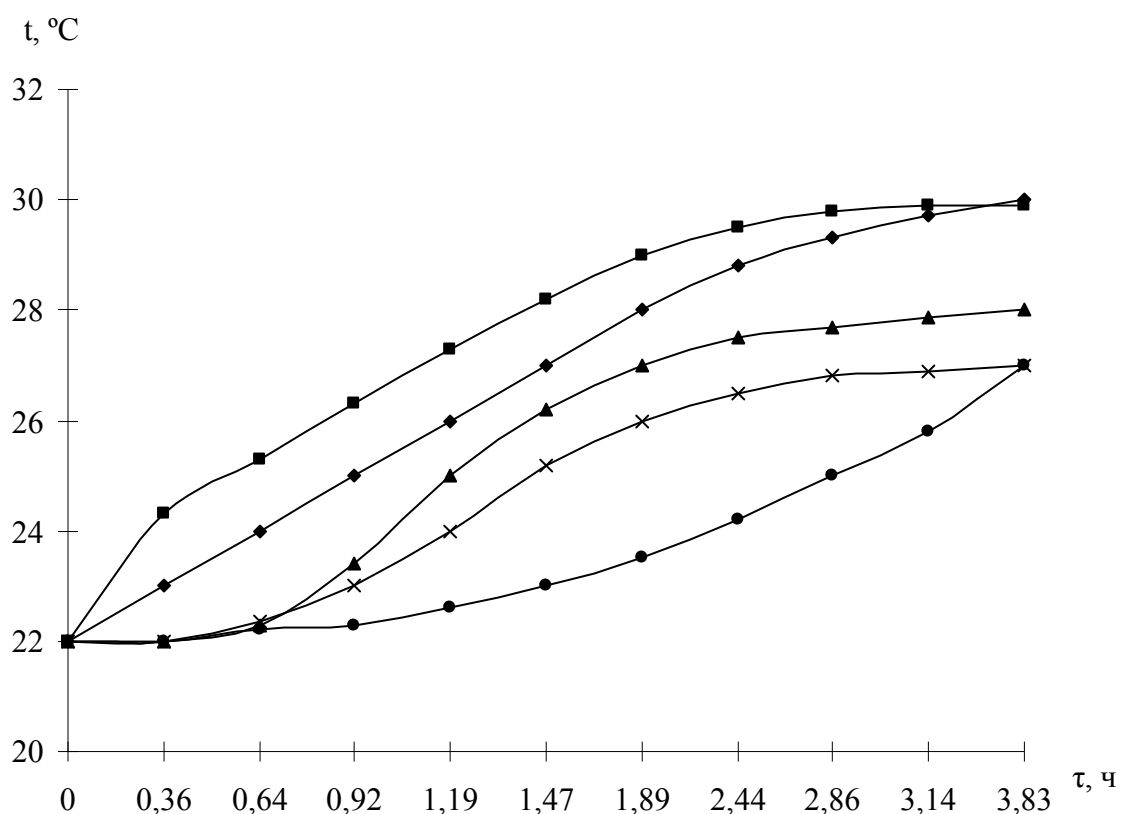


Рис. 9. Графики изменения температуры в экспериментальном резервуаре и на его поверхности:

- - температура удаляемой из резервуара газовой смеси;
- ◆— - температура на поверхности крыши резервуара с внешней стороны;
- ▲— - температура на поверхности верхнего пояса резервуара с внешней стороны;
- ×— - температура на поверхности нижнего пояса резервуара с внешней стороны;
- - температура дна резервуара с внешней стороны

Максимальная температура подаваемой инертной среды достигала 32 °С при начальной температуре окружающей среды и температуре в резервуаре 22 °С.

Полученные данные свидетельствуют о том, что дно резервуара в меньшей степени подвержено нагреву, следовательно, повышенная температура инертного газа не будет значительно влиять на интенсивность испарения остатков нефтепродуктов при их наличии.

Таким образом, проведенное экспериментальное исследование позволило выявить специфику рассеивания инертного газа в объеме защищаемой емкости, оценить степень отличия концентраций кислорода в наиболее удаленных от места подачи точках, а также определить влияние температуры подаваемой инертной среды на температурный режим резервуара в процессе флегматизации.

Для подтверждения полученных данных целесообразно проведение натурных экспериментов. Результаты исследований в дальнейшем могут быть использованы для разработки рекомендаций по проектированию систем флегматизации для вертикальных стальных резервуаров на базе мембранных воздухо-разделительных систем.

Литература

1. **Кирпичев М.В.** Теория подобия. М.: Изд-во АН СССР, 1953. 162 с.
2. **Гухман А.А.** Физические основы теплопередачи. Л., М.: Энергоиздат, 1934. 315 с.
3. **Назаров В.П.** Очистка резервуаров от остатков светлых нефтепродуктов перед проведением огневых ремонтных работ: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. 250 с.
4. **Булгаков В.В.** Обеспечение пожаровзрывобезопасности огневых аварийно-ремонтных работ на резервуарах способом флегматизации: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: Академии ГПС МЧС России, 2001. 236 с.
5. **Сорокоумов В.П.** Обеспечение пожарной безопасности резервуаров с локальными остатками нефтепродуктов при проведении аварийно-ремонтных работ: Дис. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. М.: Академии ГПС МЧС России, 2002. 160 с.