

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

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФЛЕГМАТИЗАЦИИ ПРИ ОБЕСПЕЧЕНИИ ПОЖАРОВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ЕМКОСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Аннотация. Приведены результаты аналитической оценки исследования эффективности флегматизации при обеспечении пожаровзрывобезопасности емкостного оборудования.

Ключевые слова: флегматизация, инертный газ, азот.

V.P. Nazarov, A.A. Kornilov

EFFICIENCY PHLEGMATIZATION AT MAINTENANCE OF FIRE SAFETY OF THE CAPACITOR EQUIPMENT

Abstract. Results of analytical estimation of efficiency phlegmatization are resulted at maintenance of fire safety of the capacitor equipment.

Key words: phlegmatization, inert gas, nitrogen.

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

Согласно ст. 49 Федерального закона от 22.07.2008 года № 123-ФЗ [1], одним из способов исключения условия образования горючей среды является понижение концентрации окислителя в горючей среде в защищаемом объеме. Данный способ действительно используется достаточно давно и в ряде случаев является наиболее эффективным, в том числе на резервуарах для нефти и нефтепродуктов. Однако, в технической и учебной литературе уважаемых авторов встречаются доводы, говорящие не в пользу флегматизации. Данное утверждение не совсем верно применительно к резервуарам для нефти и нефтепродуктов.

Учитывая, что опыт применения этих резервуаров растет, в рамках данной статьи будут рассматриваться не химически активные ингибиторы горения, а только тепловые термически стабильные флегматизаторы.

В учебнике [2] подчеркивается неэффективность проведения флегматизации емкостных аппаратов. В качестве примера приводится продувка аппарата с чистым горючим газом без инертного газа до безопасной концентрации (по инертному разбавителю). Основные допущения заключаются в следующем:

- давление в аппарате не увеличивается, избыток парогазовой смеси выбрасывается в атмосферу;
- рассеивание инертного газа происходит равномерно по всему объему аппарата.

Уравнение материального баланса для флегматизатора в общем виде выглядит следующим образом:

$$Vd\varphi = q d\tau - d\varphi d\tau, \quad (1)$$

где V – объём защищаемой емкости, m^3 ;
 φ – концентрация инертного газа, *об. доли*;
 τ – время продувки, *с*.

Об эффективности флегматизации делается вывод по следующему частному решению приведенного выше уравнения:

$$\tau = \frac{V}{q} \ln \frac{1}{1 - \varphi_{\text{ин}}}, \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{ин}}$ – конечная (безопасная) концентрация инертного газа, *об. доли*.

А именно, при $\varphi_{\text{ин}} \rightarrow 1$ время продувки $\tau \rightarrow \infty$, то есть при флегматизации продувкой значительная часть негорючего газа транзитом выбрасывается в атмосферу.

Уравнение (2) действительно является частным случаем решения уравнения (1), в общем виде решение выглядит следующим образом:

$$\tau = \frac{V}{q} \ln \frac{\varphi_{\text{вх}} - \varphi_0}{\varphi_{\text{вх}} - \varphi_{\text{ин}}}, \quad (3)$$

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

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

Если принять $\varphi_{\text{вх}}$ и φ_0 равными 1 в соответствии с указанными выше начальными условиями, то получим формулу (2).

Построим зависимость времени флегматизации среды от величины требуемой безопасной концентрации инертного газа (рис. 1). Для наглядности в качестве расчетной рассмотрим наиболее простую ситуацию, при которой производится заполнение емкости чистым газообразным азотом, в которой находится среда, на 21 % состоящая из кислорода и на 79 % – азота.

Отношение требуемого для продувки объёма инертного газа к объёму защищаемого аппарата имеет аналогичную зависимость (рис. 2).

Согласно [3], для достижения безопасной концентрации кислорода в резервуар должно быть подано количество инертного газа, равное 4-5 объёмам резервуара. Из полученного графика (рис. 2) видно что подача 4-5 объёмов необходима для достижения концентрации кислорода менее 0,5 %. На сегодняшний день накоплен большой опыт исследования минимальных флегматизирующих концентраций (МФК) и минимального взрывоопасного содержания кислорода (МВСК), имеющиеся экспериментальные данные в различных источниках варьируются в достаточно широких пределах и существенно зависят от применяемого инертного газа. Определение истинных значений минимальной флегматизирующей концентрации не является целью настоящей статьи, поэтому лишь отметим, что согласно данным [4-8] безопасная концентрация кислорода варьируется в пределах 8-16 % в зависимости от среды и применяе-

мого инертного газа. Таким образом, согласно представленному на рис. 2 графику видно, что для достижения указанных значений МВСК требуется подача 0,2-1 объёма резервуара. В случаях, когда необходимо обеспечить остаточное содержание кислорода не более 1 %, что, например, предусмотрено [9], достаточно подачи 3 объёмов.

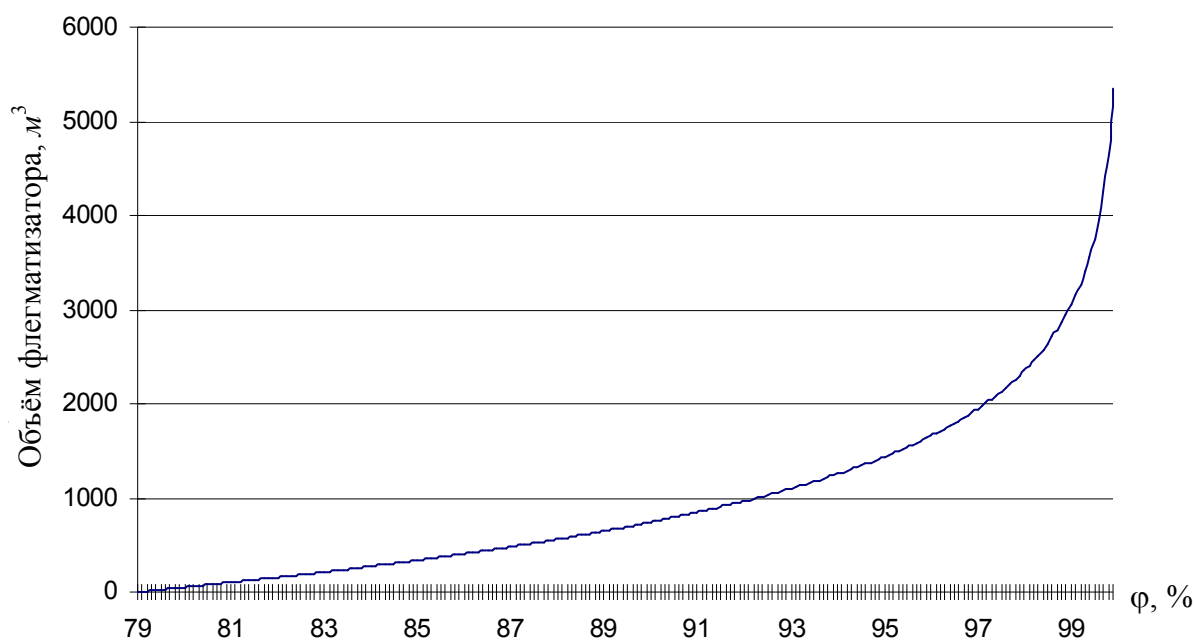


Рис. 1. Зависимость времени продувки от концентрации флегматизатора

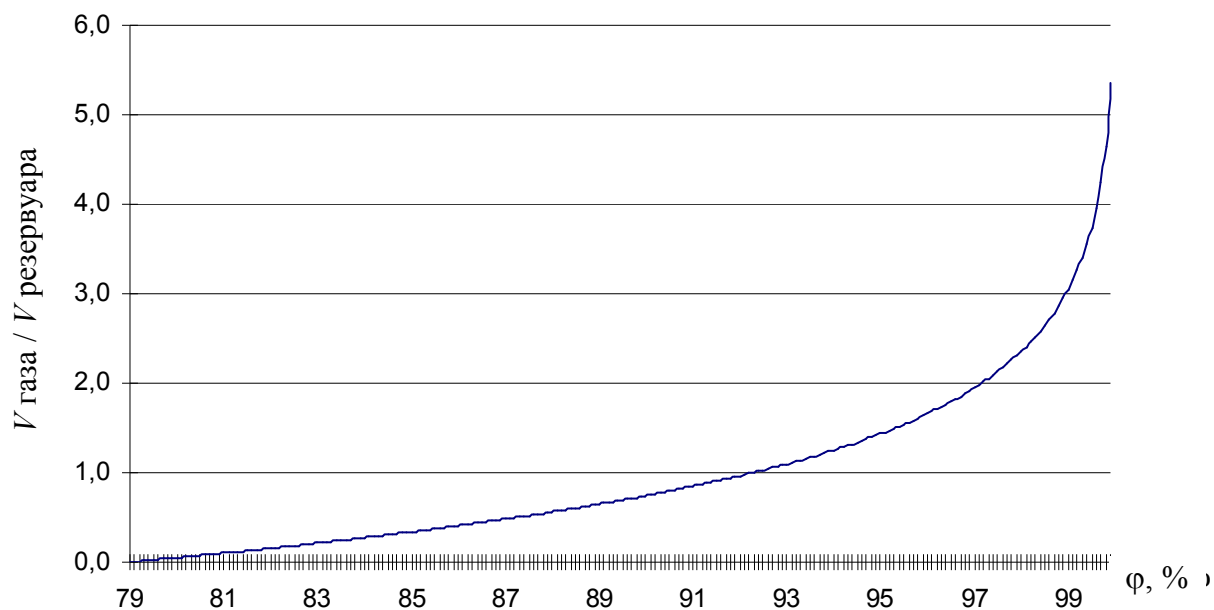


Рис. 2. Зависимость отношения требуемого объёма газа к объёму резервуара от концентрации флегматизатора

Таким образом, утверждение о том, что время флегматизации стремится к нулю, верно лишь в том случае, если необходимо полное удаление кислорода из защищаемого объёма, что в действительности не производится и, согласно

приведенным выше экспериментальным данным, не требуется.

Нельзя не признать, что доля удаляемого инертного газа тоже весьма велика (рис. 3), она также зависит от требуемой величины МВСК.

Соответственно зависимость эффективности подаваемого инертного газа (т.е. отношение количества флегматизатора, остающегося в защищаемой емкости, к общему объёму поданного в резервуар газа) от требуемой концентрации имеет обратную тенденцию (рис. 4).

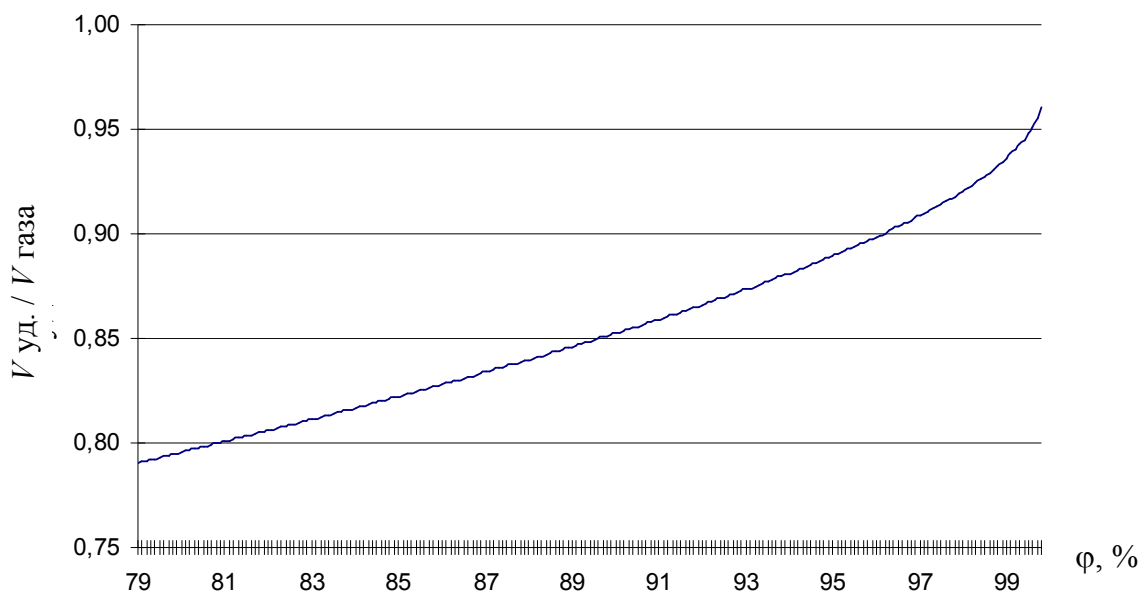


Рис. 3. Отношение удаляемого объема газа к общему количеству поданного газа в зависимости от концентрации флегматизатора

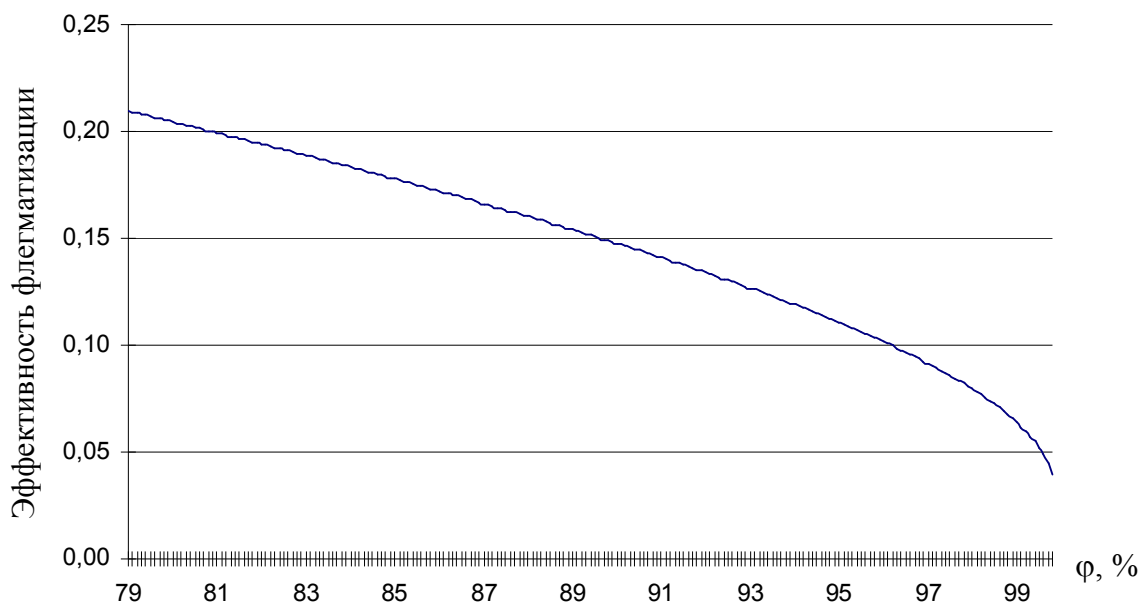


Рис. 4. Эффективность флегматизации в зависимости от концентрации флегматизатора

Каждый из представленных графиков имеет одну, заметную невооруженным глазом, особенность, а именно, представленные зависимости не являются линейными и для достижения малых концентраций МВСК требуется существенно большее количество инертного газа. Например, согласно рис. 2, для создания концентрации 1 % по кислороду требуется в 2 раза больше инертного газа, чем для концентрации 5 %. Вместе с тем, величина требуемого количества газа достаточно монотонно возрастает в пределах 79-92 % по флегматизатору (рис. 1). Учитывая, что внедрение каких-либо технологий, направленных на обеспечение пожарной безопасности, на сегодняшний день в значительной степени связано со стремлением владельца к уменьшению финансовых вложений, вопрос относительно необходимого количества инертного газа напрямую влияет на величину затрат на противопожарную защиту и является одним из важнейших факторов при выборе того или иного способа обеспечения пожарной безопасности на объекте.

По представленным зависимостям сделать вывод о предельном значении концентрации кислорода, до которой процесс подачи инертного газа будет эффективным, без введения дополнительных критериев не представляется возможным. Тем не менее, предполагается, что в определенный момент времени достигается состояние газовой среды, при котором дальнейшая подача инертного газа приводит к его перерасходу (пример приведен выше), а следовательно, влечет неоправданное увеличение капиталовложений.

В действительности уравнение (3) далеко не в полной мере описывает процесс флегматизации, поскольку следует учитывать и наличие паров горючего в защищаемом объеме. Для более детальной оценки воспользуемся математической моделью процесса флегматизации резервуаров для нефти и нефтепродуктов Булгакова [11]. Запишем систему уравнений для случая продувки освобожденного от нефтепродуктов резервуара:

$$\begin{cases} V d\varphi_{\text{нп}} + q \varphi_{\text{нп}} d\tau = 0, \\ V d\varphi_{\text{ф}} + q \varphi_{\text{ф}} d\tau = q \varphi_{\text{ф}}^{\text{п}} d\tau, \\ 0,21 \cdot (1 - \varphi_{\text{нп}} - \varphi_{\text{ф}}) = \varphi_{\text{к}} \end{cases} \quad (4)$$

где $\varphi_{\text{нп}}$ – среднеобъемная концентрация паров нефтепродукта, *об. доли*;
 $\varphi_{\text{ф}}$ – среднеобъемная концентрация флегматизатора, *об. доли*;
 $\varphi_{\text{ф}}^{\text{п}}$ – концентрация флегматизатора в подаваемой инертной среде, *об. доли*;

$\varphi_{\text{к}}$ – среднеобъемная концентрация кислорода, *об. доли*;

Следует также учесть, что если в качестве флегматизатора применяется азот, то последняя формула должна использоваться без коэффициента 0,21. Неравномерность распределения паров нефтепродуктов в данном случае может не учитываться, поскольку определяющим фактором является достижение МВСК независимо от того, находится ли концентрация паров нефтепродуктов в пределах воспламеняемости.

После интегрирования система уравнений (4) выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \tau = \frac{V}{q} \ln \frac{\varphi_{\text{нп}}^{\circ}}{\varphi_{\text{ин}}} \\ \tau = \frac{V}{q} \ln \frac{\varphi_{\text{ex}} - \varphi_o}{\varphi_{\text{ex}} - \varphi_{\text{ф}}} \\ 1 - \varphi_{\text{нп}} - \varphi_{\text{ф}} = \varphi_{\text{к}} \end{cases} \quad (5)$$

где $\varphi_{\text{нп}}^{\circ}$ – среднеобъемная концентрация паров нефтепродукта перед началом флегматизации, *об. доли*.

Проведем расчет флегматизации резервуара, из которого была откачана основная масса жидкого нефтепродукта (допустим, бензин АИ-93).

Для сравнения определим отношение требуемого для продувки объема инертного газа к объему защищаемого аппарата (рис. 5). Поскольку соотношение между концентрациями флегматизатора и кислорода несколько более сложное, чем в предыдущем случае, то для наглядности по оси абсцисс откладываем концентрацию кислорода (рис. 5). Зависимость, безусловно, имеет вид, аналогичный представленным на рис. 1-3. Но в последнем случае инертного газа требуется несколько меньше за счет присутствия паров нефтепродукта.

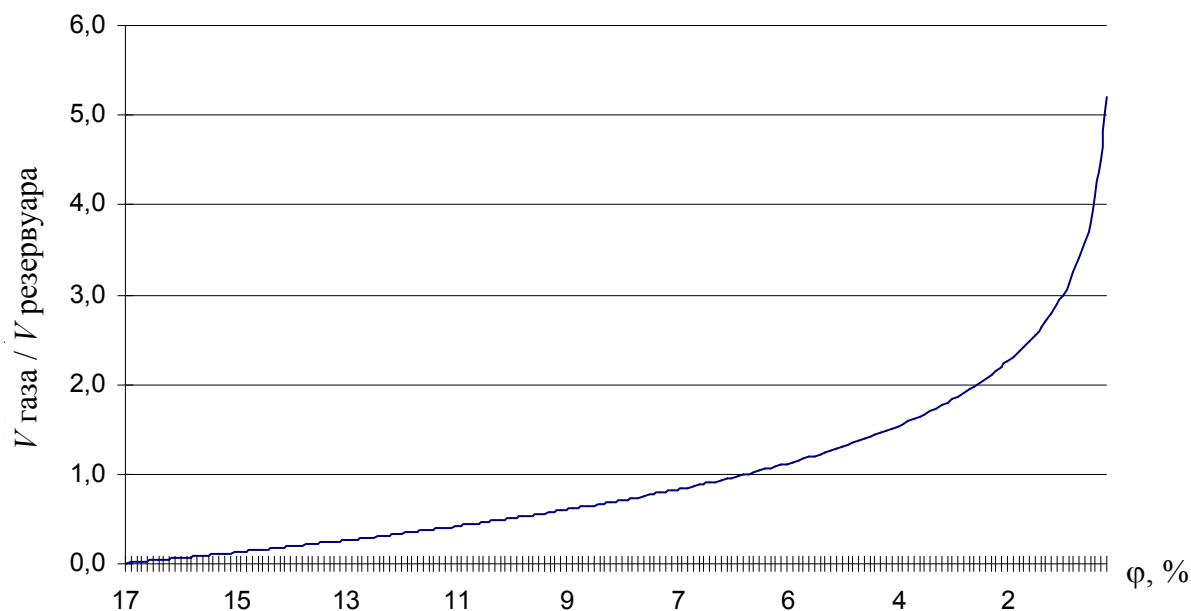


Рис. 5. Зависимость времени флегматизации от концентрации кислорода

Определим для рассматриваемого расчетного сценария относительный прирост инертного газа по формуле:

$$K_i = \frac{V_i - V_{i-1}}{V} \quad (5)$$

Данная величина будет зависеть от интервала между V_i и V_{i-1} , то есть от $\Delta\tau$ и $\Delta\varphi$. Получение аналитического вида данной зависимости с помощью системы уравнений (4) или (1) предполагает решение достаточно сложной математической задачи, поэтому воспользуемся графо-аналитическим методом. А именно, примем интервал $\Delta\varphi$ равным 0,1 % и построим график зависимости параметра K от φ (рис. 6) для выбранного ранее расчетного сценария.

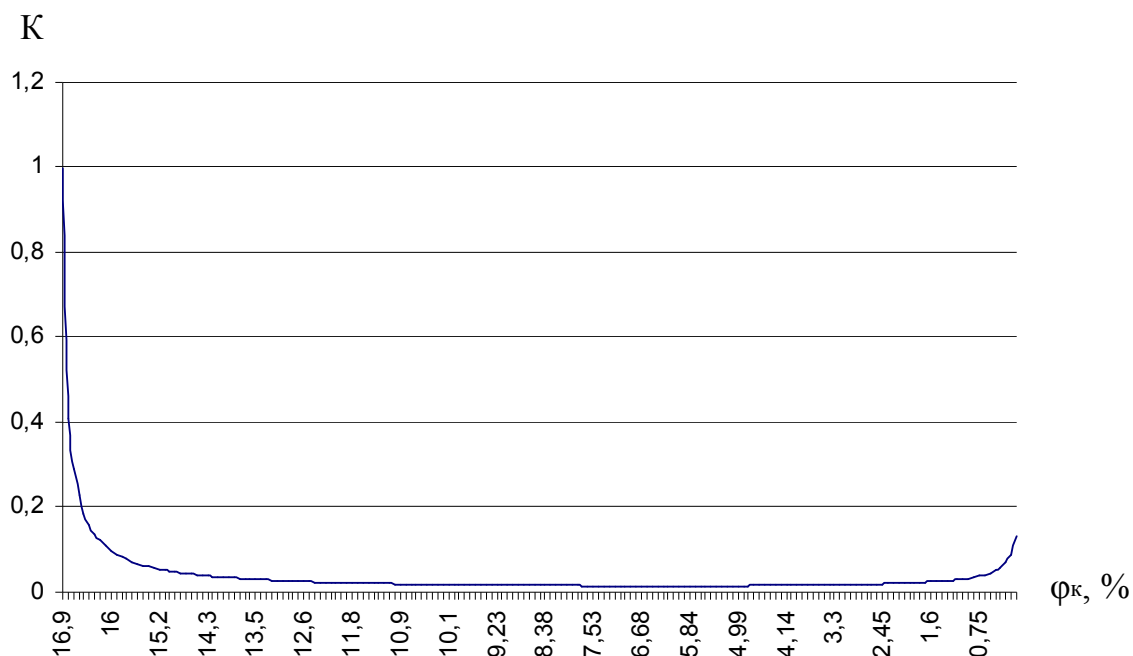


Рис. 6. Зависимость параметра K от φ (при $\Delta\varphi = 0,1 \%$)

На представленном графике отчетливо видно увеличение предлагаемого показателя, то есть при достижении определенной концентрации относительный прирост подаваемого объема газа начинает увеличиваться. На рис. 7 приведен участок данного графика в пределах от 5,2 до 7,3 % кислорода.

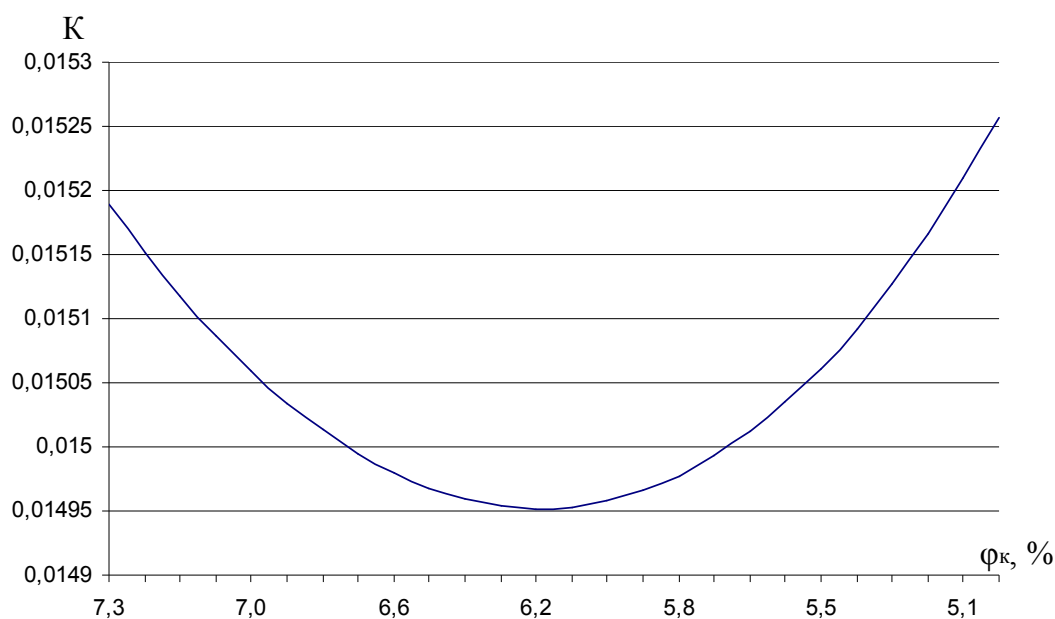


Рис. 7. Фрагмент графика зависимости параметра K от φ (при $\Delta\varphi = 0,1 \%$)

По рис. 7 видно, что до концентрации 6,2 % по кислороду происходит монотонное снижение данного показателя. В дальнейшем снижение концентрации кислорода требует увеличения подачи инертного газа, что и влечет за собой перерасход и дополнительные капиталовложения. При этом, полученное значение не зависит от величин Δt или $\Delta \varphi$. Не зависит оно также от объёма защищаемой емкости и подаваемого расхода. Найденная пороговая величина может изменяться в зависимости от начальной концентрации нефтепродуктов в резервуаре. На основании системы уравнений (5) и (6) был проведен комплекс расчетов, в результате чего построена зависимость порогового значения кислорода от начальной концентрации нефтепродукта (рис. 8).

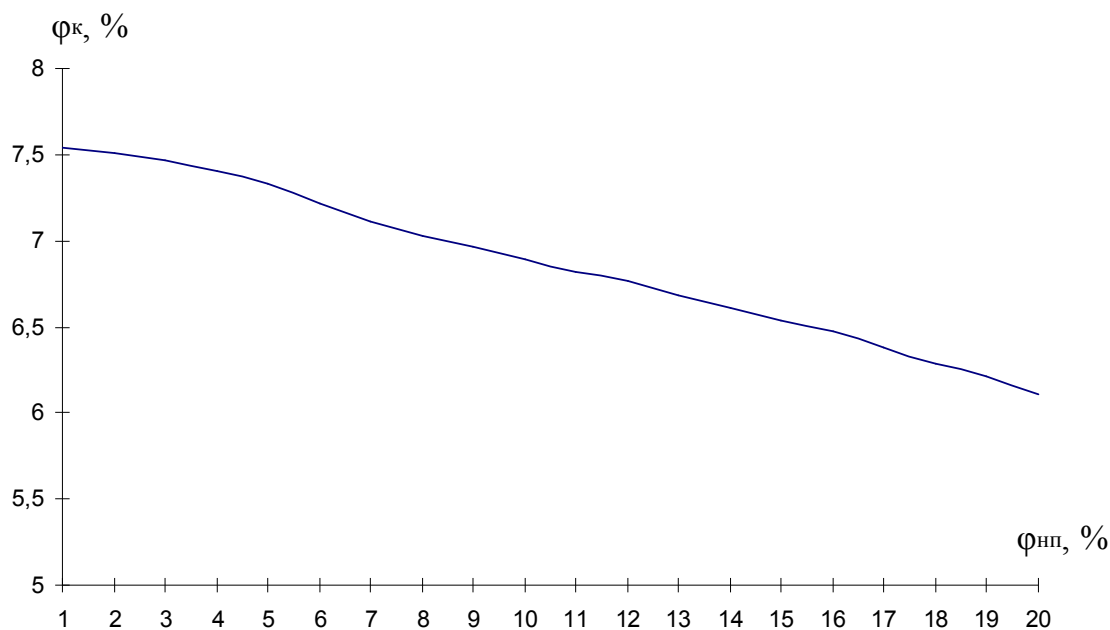


Рис.8. Зависимость порогового значения кислорода от начальной концентрации нефтепродукта

Кроме того, параметр K будет изменяться в случае использования инертной среды с содержанием инертного газа, отличным от 100 %, например, азота мембранного разделения, в котором содержание кислорода может быть до 5 % в зависимости от настроек оборудования. Для данного случая также был произведен комплекс расчетов, на основании которых построена зависимость величины порогового значения кислорода от концентрации кислорода в подаваемой инертной среде (рис. 9).

Приведенные в первой части статьи значения необходимых объёмов и времени продувки не могут быть в чистом виде применены при проектировании систем флегматизации, а предназначены для наглядной демонстрации протекающих в защищаемой емкости процессов и опровержении утверждения о неэффективности способа флегматизации. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от начальной концентрации паров нефтепродуктов и состава подаваемой инертной среды при флегматизации парогазовой смеси до 6-8 % по кислороду не требует перерасхода инертного газа, а следовательно, и флегматизация аппарата происходит достаточно эффективно.

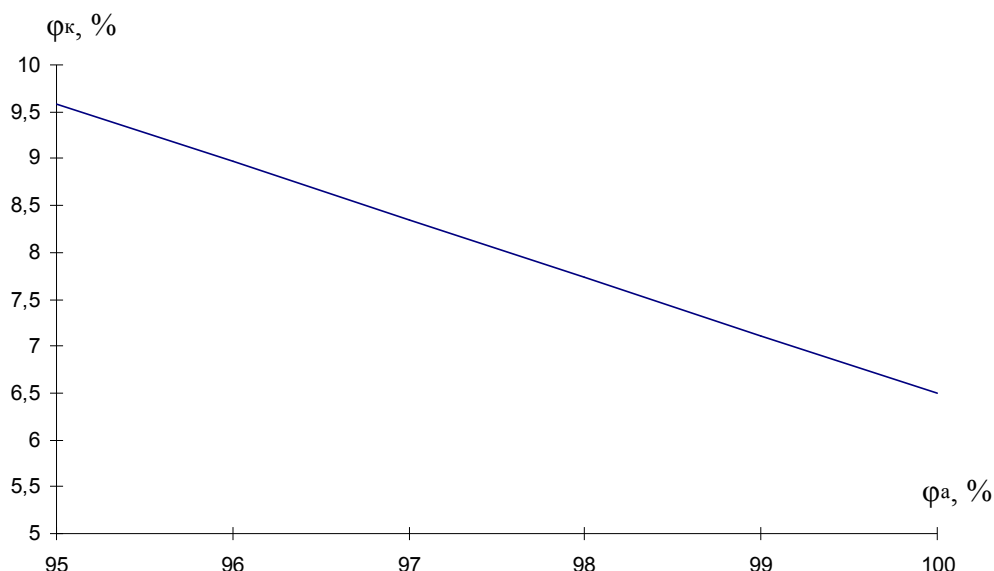


Рис. 9. Зависимость порогового значения кислорода от концентрации азота в подаваемой инертной среде

В настоящее время в Академии ГПС МЧС России проводится детальное исследование процессов флегматизации емкостных аппаратов, результаты которых в дальнейшем могут быть внедрены в практику проектирования.

Литература

1. **Федеральный закон** от 22.07.2008 года № 123-ФЗ "Технический регламент о требованиях пожарной безопасности".
2. **Алексеев М.В., Волков О.М., Шатров Н.Ф.** Пожарная профилактика технологических процессов производств: Учебник. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1986. 370 с.
3. **Волков О.М.** Пожарная безопасность резервуаров с нефтепродуктами. М.: Недра, 1984. 151 с.
4. **Назаров В.П.** Пожаровзрывобезопасность предремонтной подготовки и проведения огневых работ на резервуарах: Дис. на соиск. уч. степ. д-ра техн. наук. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1993. 545 с.
5. **Попов А.С.** Влияние флегматизирующих газов на взрывоопасные пределы углеводородных топлив // Безопасность труда в промышленности. 1971. № 4. С. 44-46.
6. **Стрижевский И.И.** О предельном содержании кислорода в инертных продувочных газах. // Безопасность труда в промышленности. 1964. № 3. С. 23-24.
7. **Корольченко А.Я., Корольченко Д.А.** Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения. Справочник: в 2 ч. – 2-е изд. перераб. и доп. М.: Асс. "Пожнаука", 2004. Ч.2. 744 с.
8. **Кулаков В.Г., Копылов С.Н., Барешкин В.В.** Применение азотообогащенных газовых смесей, получаемых из атмосферного воздуха, для предотвращения воспламенения различных веществ и материалов в замкнутых объемах // Матер. науч.-практ. конф. "Актуальные вопросы пожарной безопасности". М.: ВНИИПО МЧС России, 2009. С. 126-129.
9. **Правила** промышленной безопасности для нефтеперерабатывающих производств (ПБ09-310-99). Серия 09. Выпуск 7 / Колл. авт. – 2-е изд., испр. М.: Государственное унитарное предприятие "Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2001. 47 с.
10. **Правила** безопасной эксплуатации и охраны труда для нефтеперерабатывающих производств (ПБЭ НП-2001). М., 2001.
11. **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.