

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА СУБЛИМАЦИИ ТВЁРДОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ПРИ ФЛЕГМАТИЗАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Изложены результаты очередного этапа исследования способа обеспечения пожаровзрывобезопасности ремонтных работ на горизонтальных резервуарах для нефтепродуктов с использованием твёрдого гранулированного диоксида углерода. Получены эмпирические формулы для оценки интенсивности сублимации гранул диоксида углерода в среде жидкого дизельного топлива.

Ключевые слова: флегматизация, горизонтальный резервуар для нефтепродуктов, огневые ремонтные работы.

P.I. Zykov

PILOT STUDY OF PROCESS OF SUBLIMATION OF THE SOLID GRANULATED CARBON DIOXIDE AT PHLEGMATIZATION OF HORIZONTAL TANKS

Results of the next investigation phase of a mode of ensuring fire and explosion safety of repair work on horizontal reservoirs for oil products by means of the solid granulated carbon dioxide are stated. The empirical formulas for evaluation intensity of sublimation of granules of carbon dioxide in the environment of liquid diesel are received.

Key words: phlegmatization, the horizontal reservoir for oil products, hot repair work.

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 27 ноября 2014 г.

Количество резервуаров, требующих ремонта, увеличивается с каждым годом, прежде всего, в связи с неизбежным старением резервуарного парка на фоне тенденции его роста. Например, по данным ЦНИИПСК им. Н.П. Мельникова – 90 % эксплуатируемых резервуарных парков превысили нормативный срок эксплуатации (20 лет). Ремонтные работы также часто необходимы при монтаже и демонтаже резервуарного оборудования. При этом доля пожаров в резервуарах, находящихся в стадии ремонта, достигает – 70 % [1]. Результаты анализа обстоятельств возникновения большого количества взрывов, в том числе с последующим пожаром, показали, что основной причиной являлась плохая предремонтная подготовка, связанная с некачественной очисткой резервуара от остатков нефтепродукта.

Процедура ремонта резервуаров включает в себя широкий спектр разнообразных пожароопасных работ, резервуары при этом выводятся из нормального технологического режима, поэтому возникают условия для образования горючей паровоздушной смеси. В соответствии с традиционной технологией ремонта, очистка от нефтепродукта является обязательным мероприятием при подготовке резервуаров к проведению ремонтных работ, процесс этот достаточно длительный, трудоёмкий и дорогостоящий.

В случае с *резервуарами горизонтальными стальными (РГС)* одним из перспективных способов обеспечения пожаровзрывобезопасности ремонтных работ является флегматизация их внутреннего пространства инертным газом. По флегматизирующей активности из числа термически стабильных инертных газов лидирующую позицию занимает углекислый газ (CO_2) благодаря его теплофизическим свойствам. Однако, его применение в газообразном состоянии для флегматизации резервуаров запрещено большинством нормативных документов по пожарной безопасности, что связано с опасностью образования в процессе продувки разрядов статического электричества.

В данном случае альтернативой может служить способ флегматизации взрывоопасных объёмов посредством подачи в слой остаточного нефтепродукта CO_2 в твёрдом фазовом состоянии ("сухого льда").

Помимо этого, в связи с отсутствием систематических исследований способа флегматизации резервуаров на основе применения твёрдого диоксида углерода и научно обоснованных рекомендаций для реализации данного способа, его использование не получило широкой апробации.

В рамках данной статьи изложены результаты очередного этапа исследования способа флегматизации РГС для нефтепродуктов с использованием *твёрдого гранулированного диоксида углерода (ТГДУ)*. Одним из наиболее важных вопросов стало исследование процесса сублимации ТГДУ при подаче в жидкий нефтепродукт.

Способ подачи ТГДУ выбран неслучайно. Критический анализ научных работ по вопросам сублимации "сухого льда" в среде атмосферного воздуха и жидкого нефтепродукта показал (рис.1), что в последнем случае процесс сублимации протекает гораздо интенсивнее (в среднем в 60 раз), кроме того при сублимации в среде атмосферного воздуха наблюдается эффект "самозатухания" процесса [2-5].

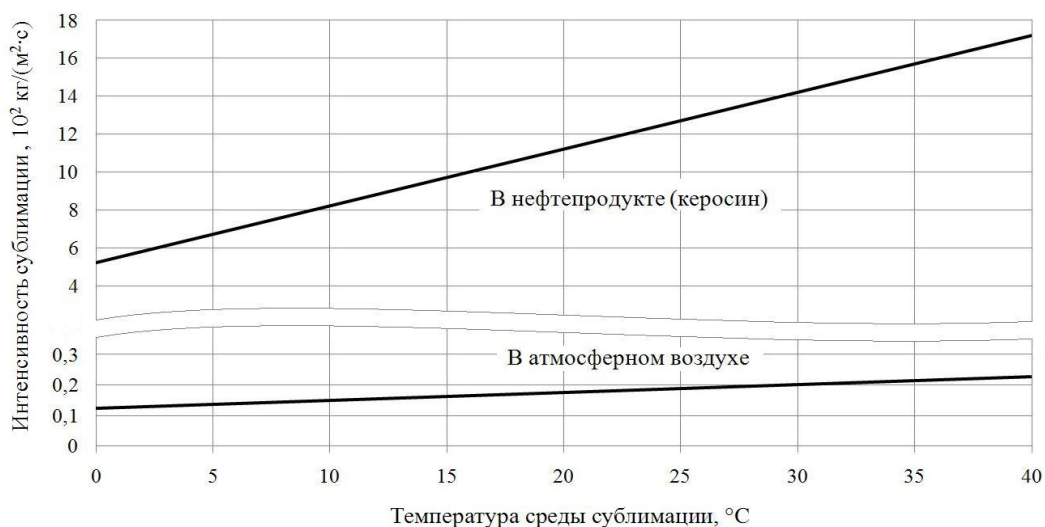


Рис. 1. Зависимости интенсивности сублимации "сухого льда" от температуры среды, в которой он находится (нефтепродукт и атмосферный воздух)

На основании вышеизложенного, а также серии проведённых ранее качественных экспериментов, был сделан вывод о том, что для флегматизации посредством ТГДУ целесообразно наличие остаточного количества жидкого нефтепродукта в ремонтируемом резервуаре, тем самым, будет существенно снижено время достижения пожаровзрывобезопасного состояния.

Принципиальная схема способа флегматизации РГС с остатком нефтепродукта представлена на рис. 2 [6].

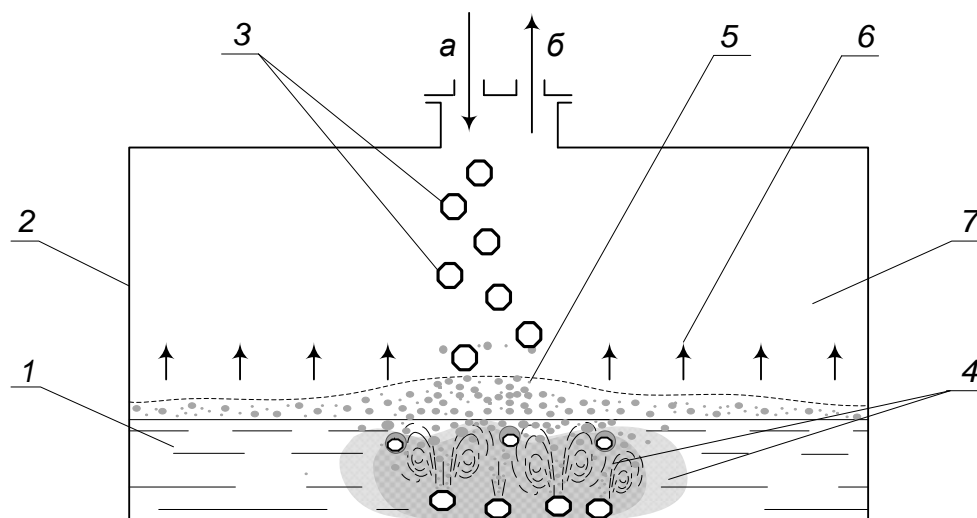


Рис. 2. Принципиальная схема флегматизации РГС с нефтепродуктом ТГДУ:

- 1 – жидкий нефтепродукт; 2 – РГС; 3 – ТГДУ; 4 – условная область сублимации ТГДУ; 5 – условная область накопления сублимированного газа CO_2 ; 6 – направление распределения газа CO_2 ; 7 – вытесняемая и разбавляемая взрывоопасная парогазовая среда РГС; а – направление подачи гранул "сухого льда"; б – направление выхода парогазовой смеси

Время и условия достижения пожаровзрывобезопасного состояния парогазовой среды резервуара в значительной степени зависят от интенсивности поступления инертного газа в его объём, поэтому, в первую очередь, необходимо количественно оценить интенсивность данного процесса.

В работе [2] ТГДУ подаётся в резервуар вертикальной стальной для тушения пожара, в этом случае гранулы подаются в большой объём уже нагретого нефтепродукта, вследствие чего процесс происходит очень интенсивно. Однако, при флегматизации РГС подача ТГДУ осуществляется локально в небольшой слой остаточного нефтепродукта, имеющего температуру окружающей среды для подземного РГС – порядка $4\text{ }^\circ\text{C}$. Таким образом, данные об интенсивности сублимации ТГДУ, полученные автором [2], для описания процесса флегматизации РГС могут быть применены только в качестве ориентировочных или максимально возможных.

Для определения интенсивности сублимации в зависимости от количества единовременно поданного ТГДУ в различные виды нефтепродукта, его начальной температуры, закономерности распределения ТГДУ в нефтепродукте в зависимости от размера порции, был разработан *лабораторный стенд (ЛС)* (рис. 3).

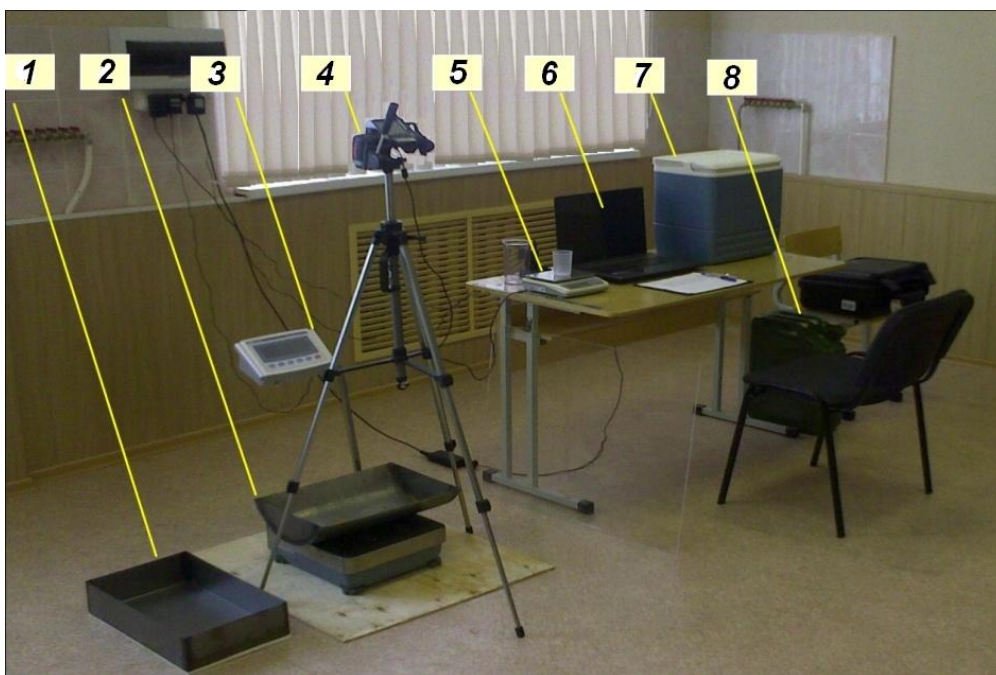


Рис. 3. Общий вид ЛС:

1- ЭП-1; 2-ЭП-2; 3-электронные весы с термоизолированной платформой для установки экспериментальных поддонов; 4 – тепловизор FLIR T335 на штативе; 5-электронные весы для измерения количества, подаваемого на сублимацию ТГДУ; 6 – компьютер с опцией подключения приборов (поз. № 3, 4 и 5); 7 – изотермический контейнер для хранения ТГДУ; 8 – канистра с нефтепродуктом

Термочувствительный элемент тепловизора направлялся в сторону плоскости зеркала нефтепродукта, помещённого в поддоны, имитирующие участок днища резервуара. В экспериментах использовались поддоны с плоским дном (ЭП-1) и в виде сегмента цилиндра (ЭП-2), которые устанавливались на термоизолированную платформу электронных весов. Съёмка зеркала нефтепродукта с использованием тепловизора осуществлялась в режиме "картинка в картинке", что позволяло одновременно получать реальное изображение процесса сублимации и изображение в инфракрасном спектре (термограмму).

Одним из видов нефтепродукта, используемого для лабораторных исследований, было **дизельное топливо (ДТ)**. На стадии проведения серии качественных экспериментов внимание привлекла значительно более низкая интенсивность сублимации ТГДУ в ДТ, чем, например, при подаче гранул углекислоты в слой бензина. В свою очередь, это отразилось и на распределении температурных полей (рис. 4).

По рис. 4 видно, что гранулы ТГДУ концентрируются в ДТ непосредственно в месте подачи, образуя насыпь, близкую по форме к сегменту шара, которая в процессе сублимации пропорционально уменьшается в своих размерах (высота и диаметр). Эта особенность приводит к ограничению площади контакта ТГДУ с ДТ, тем самым уменьшается подвод тепла и дополнительно снижается интенсивность сублимации. Столь существенное влияние теплового баланса позволило сделать предположение о влиянии начальной температуры

ДТ на интенсивность сублимации. В результате серии качественных экспериментов предположение подтвердилось. Более того, при определённом соотношении объёма ДТ и ТГДУ возникло явление так называемого "температурного шока" ДТ в месте концентрации поданных гранул, когда сублимация полностью прекращается (рис. 5).

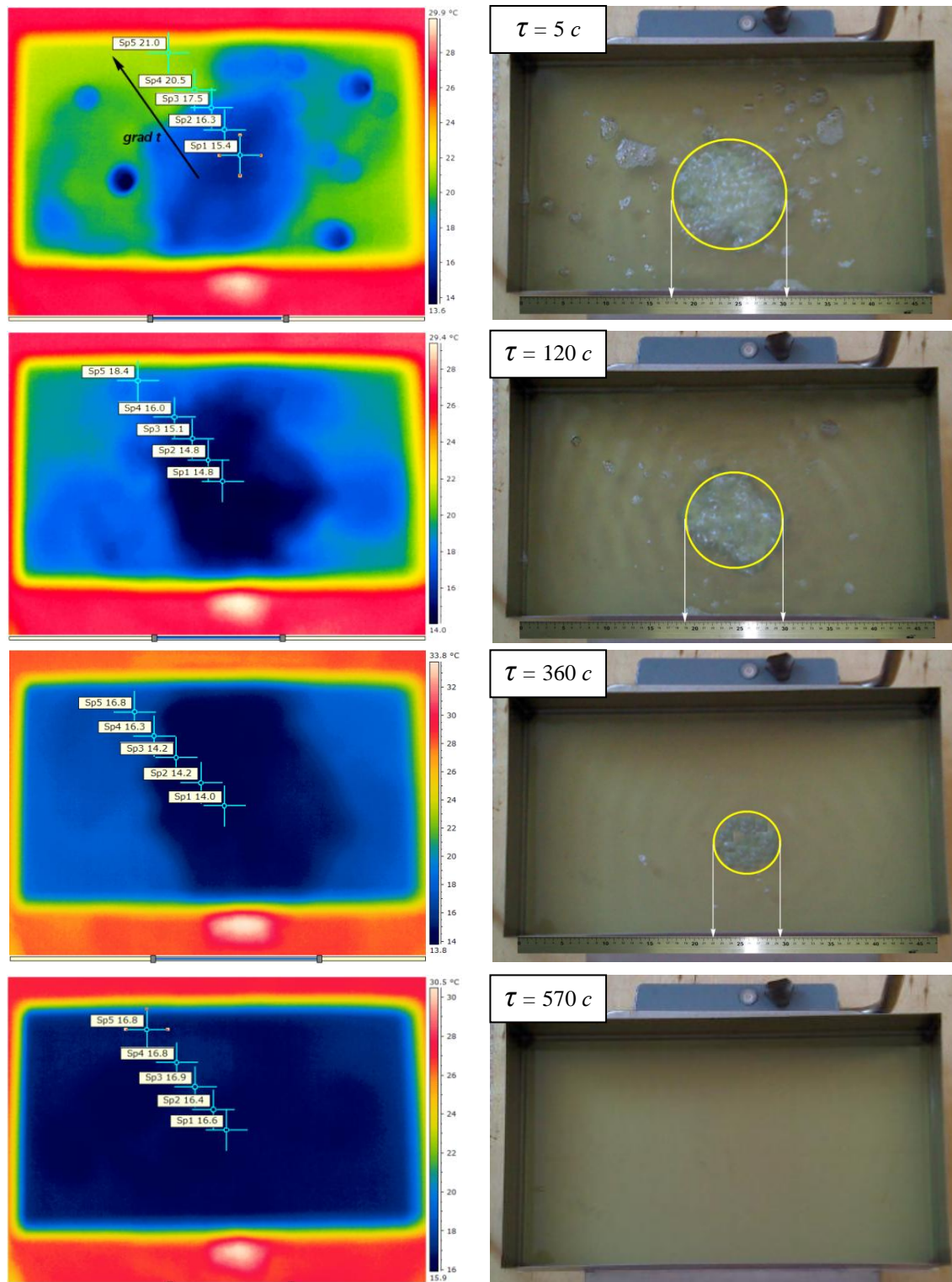


Рис. 4. Сублимация ТГДУ (масса порции 90 г) в ДТ при начальной температуре 22 °С



Рис. 5. "Температурный шок" при подаче критического количества ТГДУ в ДТ

Таким образом, после серии качественных экспериментов было принято решение о необходимости моделирования интенсивности поступления газообразного CO_2 при сублимации ТГДУ в среде ДТ в зависимости от массы поданной порции гранул и начальной температуры ДТ.

Для получения необходимой информации была проведена серия экспериментов по определению указанных выше параметров. Полученный массив данных был статистически обработан, и было подтверждено отсутствие "случайных" или "грубых" измерений.

В первую очередь, были объединены данные лабораторных и полигонных испытаний о размерах насыпи в зависимости от массы порции ТГДУ (рис. 6). Это необходимо для описания площади контактной поверхности ТГДУ и ДТ в рамках математической модели динамики параметров парогазовой среды РГС при флегматизации.

В результате аппроксимации данных получена зависимость, позволяющая с высокой степенью точности (коэффициент корреляции составил более 0,98) определить диаметр и высоту сегмента шара, образующегося при подаче ТГДУ в ДТ:

$$d = 0,265 \cdot m^{0,378}, \quad (1)$$

$$h = 0,043 \cdot m^{0,328}, \quad (2)$$

где d и h – соответственно, диаметр и высота насыпи ТГДУ, м;
 m – масса порции ТГДУ, кг.

Также установлено, что начальная температура ДТ существенно не влияла на распределение порции ТГДУ и размеры насыпи.

В результате анализа экспериментальных данных была определена удельная интенсивность сублимации в зависимости от температуры ДТ для различных порций ТГДУ, а также средняя удельная интенсивность сублимации (рис. 7).

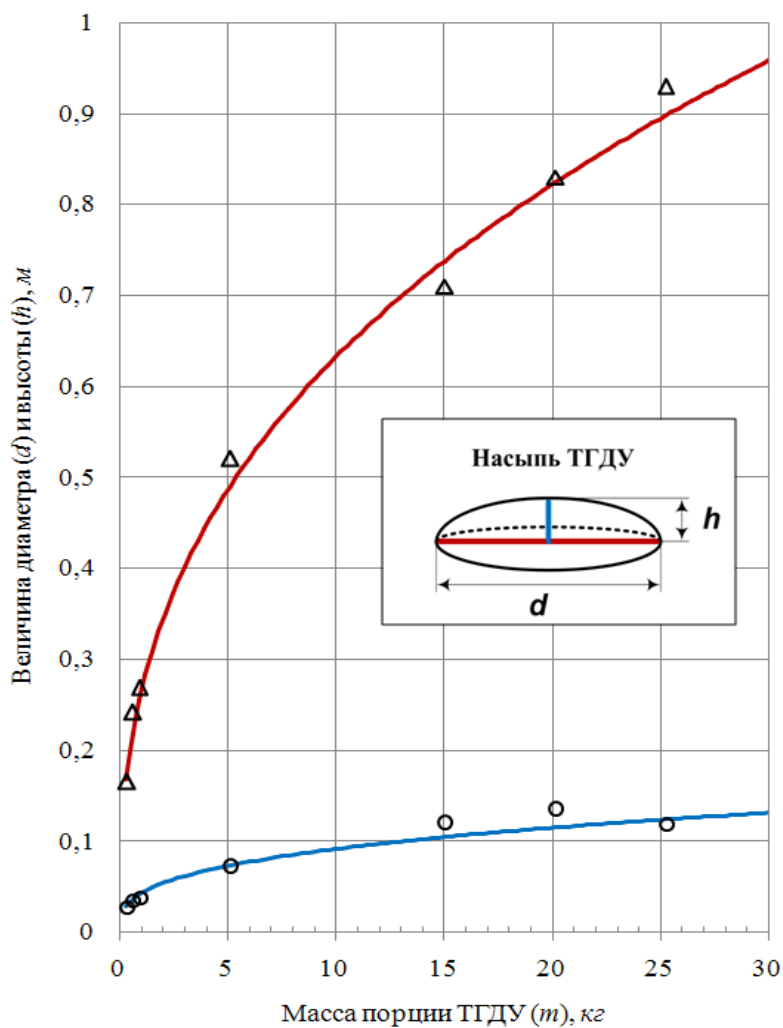


Рис. 6. Размеры насыпи ТГДУ в зависимости от массы по результатам лабораторных и полигонных исследований:
 Δ – диаметр насыпи (d); ○ – высота насыпи (h)

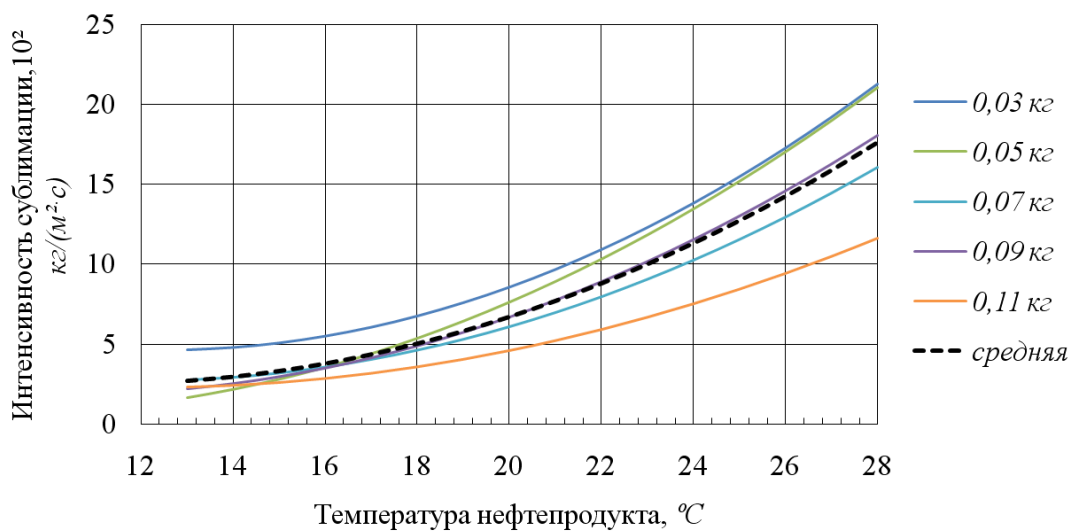


Рис. 7. Интенсивность сублимации ТГДУ в зависимости от температуры нефтепродукта

В результате была получена зависимость удельной интенсивности сублимации ТГДУ от температуры ДТ:

$$j_{ТГДУ}^{ДТ} = 0,0033 \cdot t_{ДТ}^{2,56}, \quad (3)$$

где $j_{ТГДУ}^{ДТ}$ – удельная интенсивность сублимации ТГДУ в среде жидкого дизельного топлива, кг/(м²·с);

$t_{ДТ}$ – температура дизельного топлива, °С.

Полученные данные, а также результаты их аппроксимации в виде формул (1)-(3) будут использованы при разработке математической модели динамики параметров парогазовой среды при флегматизации РГС посредством подачи ТГДУ, а также рекомендаций по осуществлению предремонтной подготовки РГС данным способом.

Литература

1. **Назаров В.П., Коротовских Я.В.** Компьютерные технологии прогнозирования пожаровзрывоопасности производственных объектов // Технологии техносферной безопасности: интернет-журнал. Вып. 5 (33). 2010. 6 с. <http://ipb.mos.ru/ttb>.

2. **Старков Н.Н.** Тушение пожаров нефтепродуктов и полярных жидкостей в резервуаре диоксидом углерода твердым гранулированным: дис. ... канд. тех. наук. М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. 174 с.

3. **Фетодотов Е.Л.** Скорость сублимации сухого льда // Холодильная техника. 1963. № 3. С. 28-29.

4. **Алтунин В.В.** Теплофизические свойства двуокиси углерода. М.: изд-во стандартов, 1975. 546 с.

5. **Пименова Т.Ф.** Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. М.: Лёгкая и пищевая промышленность, 1982. 208 с.

6. **Зыков П.И., Корнилов А.А.** Способ подготовки горизонтальных резервуаров для светлых нефтепродуктов к проведению ремонтных огневых работ // Патент № 2501585 Российская Федерация. 2013. Бюл. № 35. 13 с.