

# **БУЛАТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ**

**Материалы IV Международной  
научно-практической конференции  
(31 марта 2020 г.)**

Зарегистрировано в Национальном агентстве ISSN  
Российской Федерации 27.07.2017

**ISSN 2587-8913**

---

**В 7 ТОМАХ**

**ТОМ 4:**

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ТРАНСПОРТА И ХРАНЕНИЯ  
НЕФТИ, ГАЗА И ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ**

---

**Сборник статей**

Краснодар  
2020

УДК 622.1+622.691.4  
ББК 33.1+39.76+39.77  
Б90

**Б90 Булатовские чтения** : материалы IV Международной научно-практической конференции (31 марта 2020 г.) : в 7 т. : сборник статей / под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. О.В. Савенок. – Краснодар : Издательский Дом – Юг.

Т. 4: Современные технологии транспорта и хранения нефти, газа и продуктов переработки. – 2020. – 184 с.

Сборник содержит материалы IV Международной научно-практической конференции «Булатовские чтения», проведенной в г. Краснодаре 31 марта 2020 г., посвященной памяти выдающегося инженера-нефтяника, доктора технических наук, профессора, академика Анатолия Ивановича Булатова.

Участники конференции дали всестороннюю характеристику развития нефтегазовой отрасли, проанализировали применяемые на сегодняшний день методы, технику и технологию и сделали предложения по их модернизации; выработали рекомендации по дальнейшему развитию прикладных направлений научных исследований; внесли предложения по совершенствованию кадрового обеспечения и международному сотрудничеству.

В сборнике изложены результаты исследовательских и опытно-конструкторских работ по широкому кругу вопросов, а также рассмотрены актуальные вопросы и проблемы освоения углеводородного потенциала Российской Федерации и зарубежных стран. Решение поставленных задач отражено в создании новых технологий разработки нефтегазовых месторождений, добычи, транспортировки и переработки углеводородного сырья. Широко представлены вопросы истории и современного состояния нефтегазового комплекса, подготовки кадров, разработки и внедрения энергетического и технологического оборудования, экономических и правовых исследований.

Научное издание предназначено для докторов и кандидатов наук различных специальностей, преподавателей вузов, докторантов, аспирантов, магистрантов, практикующих специалистов, студентов учебных заведений, а также всех, проявляющих интерес к рассматриваемой проблематике с целью использования в научной работе и учебной деятельности.

Издание выполнено в виде 7 томов, соответствующих тематическим направлениям работы конференции.

Материалы публикуются в авторской редакции. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы.

Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов статей. При использовании и заимствовании материалов ссылка на издание обязательна.

ББК 33.1+39.76+39.77  
УДК 622.1+622.691.4

© Коллектив авторов, 2020  
© ООО «Издательский Дом – Юг», 2020



УДК 532.1

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООВОГО РАСШИРЕНИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА АВАРИЙНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

### INFLUENCE OF THERMAL EXPANSION OF OIL PRODUCTS ON THE EMERGENCY OF TECHNOLOGICAL PIPELINES

**Спириденюк Людмила Михайловна**

кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры трубопроводного транспорта и гидравлики,  
Полоцкий государственный университет  
l.spiridenok@psu.by

**Колесникович Василий Владимирович**

магистрант,  
Полоцкий государственный университет  
vasya.kolesnikovich@gmail.com

**Аннотация.** В статье рассматривается проблема возникновения аварийных ситуаций на технологических трубопроводах нефтебаз, выполненных надземно, при замене клиновых задвижек на шаровые краны. Авторами определены предмет и объект исследования, поставлены задачи для определения факторов, влияющих на аварийность технологических трубопроводов, а также определены причины появления аварийных ситуаций. В статье рассмотрено влияние физических свойств нефтепродукта на аварийность технологических трубопроводов. Рассмотрено влияние конструктивных особенностей шаровых кранов. Рассмотрена природа и физические свойства теплового расширения жидкости. В статье рассмотрено влияние изменения температуры жидкости на рост давления. Авторами рассмотрена проблема теплового расширения и роста давления жидкости в замкнутом объеме, определены зависимости роста давления. В статье рассмотрена проблема повышения давления при тепловом расширении нефтепродукта в замкнутом трубопроводе, выполненном в наземном исполнении, определена зависимость повышения давления нефтепродуктов в замкнутом трубопроводе при тепловом расширении.

**Ключевые слова:** аварийность технологических трубопроводов, тепловое расширение жидкости, замкнутый объем нефтепродукта.

**Spiridenok Ludmila Mikhailovna**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate Professor  
Associate Professor of the Department  
of Pipeline Transport and Hydraulics,  
Polotsk State University  
l.spiridenok@psu.by

**Kolesnikovich Vasil Vladimirovich**

Undergraduate,  
Polotsk State University  
vasya.kolesnikovich@gmail.com

**Annotation.** The article discusses the problem of emergencies on technological pipelines of oil depots, made above-ground, when replacing wedge gate valves with ball valves. The authors identified the subject and object of the study, set tasks to determine the factors affecting the accident rate of technological pipelines, and also determined the causes of emergencies. The article considers the influence of the physical properties of the oil product on the accident rate of technological pipelines. The influence of design features of ball valves is considered. The nature and physical properties of the thermal expansion of the liquid are considered. The article discusses the effect of changes in fluid temperature on pressure growth. The authors considered the problem of thermal expansion and growth of fluid pressure in a closed volume, and the dependences of pressure growth were determined. The article discusses the problem of increasing pressure during thermal expansion of an oil product in a closed pipeline made in a ground-based design, and determines the dependence of an increase in pressure of oil products in a closed pipeline during thermal expansion.

**Keywords:** accident rate of technological pipelines, thermal expansion of a liquid, closed volume of oil product.

**Введение.** При реконструкции нефтебаз, а именно при замене на технологических трубопроводах клиновых задвижек на шаровые краны, возникают ситуации, которые приводят к разрыву трубопровода и запорной арматуры. Статистика показывает ряд таких случаев происшедших на нефтебазах разных компаний, расположенных на территории Республике Беларусь, а также и за рубежом. Данные аварии происходят на технологических трубопроводах, выполненных в наземном и надземном исполнениях.

При исследовании были поставлены следующие задачи:

- 1) Определить причины, приводящие к росту давления в технологических трубопроводах, заполненных нефтепродуктом;
- 2) Проанализировать природу разрешений. Определить ее взаимосвязь с внешними условиями.

В качестве объекта исследований выступает технологический трубопровод. Предметом исследования являются технологические трубопроводы, заполненные нефтепродуктом.



Оценка факторов влияющих на аварийность технологических трубопроводов при установке шаровых кранов. Рассмотрим влияние плотности нефти и нефтепродукта на изменение давления.

Физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов, характеризующие возможность транспортировки по трубопроводу, зависят от их состава.

Параметры режимов транспортировки нефти по трубопроводу определяются, главным образом, плотностью и вязкостью нефти, а также зависимостью этих ее характеристик от температуры и давления.

Плотность нефти – масса нефти в единице объема. При изменении температуры плотность нефти изменяется: при повышении температуры она уменьшается, при понижении температуры увеличивается. Зависимость плотности  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) нефти от температуры  $T$  (°C) определяется формулой:

$$\rho(T) = \rho_{20}[1 + \xi(20 - T)], \quad (1)$$

где  $\rho_{20}$  – плотность нефти при температуре 20 °C;  $\xi$  (1/°C) – коэффициент объемного расширения.

При изменении давления плотность нефти также изменяется. Несмотря на то, что все нефти являются слабо сжимаемыми жидкостями, изменение их плотности при изменении давления все же имеется. Плотность нефти при увеличении давления возрастает, а при уменьшении давления – убывает. Изменения плотности малы по сравнению с ее номинальным значением. Соответствующие поправки необходимо учитывать в приемосдаточных операциях, а также при расчетах волновых процессов в нефтепроводах.

Зависимость плотности  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>) нефти от давления  $p$  представляется формулой:

$$\rho(p) = \rho_0[1 + \beta(p - p_0)], \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – плотность нефти при стандартных условиях (атмосферном давлении  $p_0$  и температуре +20 °C);  $\beta$  (1/Па) – коэффициент сжимаемости нефти, среднее значение которого составляет 0,00078 МПа.

Для вычисления поправок к плотности на давление используют также модуль упругости  $K$  (Па) нефти, который равен  $1 / \beta$ . Тогда формула (2) записывается иначе:

$$\rho(p) = \rho_0 \left[ 1 + \frac{p - p_0}{K} \right]. \quad (3)$$

В тех случаях, когда одновременно отклоняются от номинальных значений и температура и давление, плотность  $\rho$  ( $p$ ,  $T$ ) нефти при давлении  $p$  и температуре  $T$  можно рассчитывать по формуле [1]:

$$\rho(p, T) = \rho_{20} [1 + \xi(20 - T) + (p - p_0)/K]. \quad (4)$$

Можно сделать вывод, что при увеличении давления плотность нефти и нефтепродуктов возрастает, а при уменьшении давления – уменьшается несмотря на то, что нефть слабо сжимаемой жидкостью.

Рассмотрим влияние теплового расширения нефти и нефтепродуктов.

Коэффициентом расширения называется доля единицы объема, на которую происходит расширение данного вещества при нагревании его на 1 °C.

Проведу анализ расширения в жидкостях, влияние изменения температуры на изменение давления в заполненном нефтепродуктом трубопроводе.

Можно выделить две основных причины.

1. Во-первых, в жидкостях тепловое движение молекул (атомов) состоит из сочетания колебаний молекул около положений равновесия (как в твердых телах) и происходящих время от времени скачков молекул из одного положения равновесия в другое. Повышение температуры означает увеличение энергии колебаний, и, следовательно, рост амплитуды этих колебаний. Если бы колебания молекул были строго гармоническими, то каждая молекула настолько же приближалась бы к одному из своих соседей, насколько удалялась от другого, и увеличение амплитуды ее колебаний не привело бы к изменению среднего межмолекулярного расстояния, а значит, и к тепловому расширению.

Во-вторых, в действительности молекулы совершают ангармонические (т.е. не гармонические) колебания. Это обусловлено характером зависимости сил взаимодействия между молекулами от расстояния между ними. Зависимость эта такова, что при больших расстояниях между молекулами силы взаимодействия между молекулами проявляются как силы притяжения, а при уменьшении этого расстояния меняют свой знак и становятся силами отталкивания, быстро возрастающими с уменьшением расстояния. Это приводит к тому, что при возрастании амплитуды колебаний молекул вследствие нагревания жидкости рост сил отталкивания между молекулами преобладает над ростом сил



притяжения. Другими словами, молекуле «легче» удалиться от соседа, чем приблизиться к другому. Это, конечно, должно привести к увеличению среднего расстояния между молекулами, т.е. к увеличению объема жидкости при его нагревании. Отсюда следует, что причиной теплового расширения жидкостей (и твердых тел) является не гармоничность колебаний молекул.

2. В жидкости существуют «микроступоты» – пространства, где отсутствуют молекулы. При нагревании жидкости концентрация этих «микроступот» растет, что приводит к увеличению объема жидкости [2].

Для различных случаев расширения нефтепродуктов от изменения температуры с достаточной точностью можно пользоваться следующей формулой теплового расширения:

$$V_1 = V_0 [1 + \xi(t)], \tag{5}$$

где  $V_1$  – конечный объем при температуре  $t$ ;  $V_0$  – объем жидкости при  $0\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\xi$  – коэффициент объемного расширения продукта.

Коэффициент объемного расширения определяется в зависимости от удельного веса жидкости.

Тепловое расширение нефтепродуктов вызывает резкий рост давления в закрытом сосуде. Известно, что, нагрев парафинистого мазута в закрытом сосуде с  $20$  до  $39\text{ }^\circ\text{C}$  или керосина с  $20$  до  $52\text{ }^\circ\text{C}$  вызывает повышение давления до  $250$  атм. В результате резких изменений температуры наружного воздуха, в трубопроводах, заполненных продуктами, развиваются высокие давления, приводящие к разрыву задвижек или трубопроводов [3].

Рассмотрим влияние конструктивных особенностей шарового крана

Кран – запорное устройство, в котором подвижная деталь затвора (пробка) имеет форму тела вращения с отверстием для пропускания погона, для перекрытия которого вращается вокруг своей оси.

Любой кран имеет две основные детали: неподвижную (корпус) и вращающуюся (пробку).

Однако краны классифицируют и по другим конструктивным признакам, например: по способу создания удельного давления на уплотнительных поверхностях, по форме окна прохода пробки, по числу проходов, по наличию или отсутствию сужения прохода, по типу управления и привода, по материалу уплотнительных поверхностей и т.д.

Достоинством шаровых кранов считают плотность уплотнений штока. Шаровые краны являются так называемыми четверть оборотными вентилями. При этом шток не совершает линейного перемещения, как, например, в задвижках. Линейное перемещение добавляет риск протечки уплотнений штока, поскольку по мере линейного движения штока загрязнения смогут легче проникнуть в уплотнение и повредить их. В четверть оборотных вентилях уплотнения в зависимости от типа вентиля остаются в течение всего времени работы защищенными [4].

То есть сравнивая два этих запорных органа между собой, шаровой кран является более герметичным. Доказательством этому является анализ нормативного документа ГОСТ 9544-2005 «Арматура трубопроводная. Классы и нормы герметичности затворов» [5]. Классы герметичности трубопроводной арматуры представлены в таблице 1.

**Таблица 1** – Классы герметичности трубопроводной арматуры

А	Отсутствие видимых утечек
В	Допустимые утечки при испытаниях воздухом давлением $0,6$ МПа или водой с давлением, равным $1,1$ от номинального
В1	Допустимые утечки при испытаниях воздухом номинальным давлением или давлением $0,6$ МПа при закрытии арматуры крутящим моментом, обеспечивающим удельные давления такие же, как при испытании номинальным давлением
С	Допустимые утечки при испытаниях воздухом давлением $0,6$ МПа или водой с давлением, равным $1,1$ от номинального
С1	Допустимые утечки при испытаниях воздухом номинальным давлением или давлением $0,6$ МПа при закрытии арматуры крутящим моментом, обеспечивающим удельные давления такие же, как при испытании номинальным давлением
Д	Допустимые утечки при испытаниях воздухом давлением $0,6$ МПа или водой с давлением, равным $1,1$ от номинального
Д1	Допустимые утечки при испытаниях воздухом номинальным давлением или давлением $0,6$ МПа при закрытии арматуры крутящим моментом, обеспечивающим удельные давления такие же, как при испытании номинальным давлением или водой с давлением, равным $1,1$ от номинального или водой с давлением, равным $1,1$ от номинального

Проанализировав ГОСТ 9544-2005 можно сказать следующее: класс герметичности шарового крана А, клиновое задвижка относится к классу В, то есть допускаются утечки при испытаниях воздухом давлением  $0,6$  МПа или водой с давлением, равным  $1,1$  от номинального.

Аналитическое выражение роста давления в трубопроводе при тепловом расширении жидкости. Рассмотрим задачу о нагревании жидкости в виде плоского слоя толщиной  $2b$  либо в виде цилиндрической или сферической области радиусом  $b$ , через боковые стенки. Нагревание происходит с



поверхности  $r = b$  за счет поддержания заданной температуры. При отсутствии кипения жидкости повышение давления будет происходить только за счет термического расширения по всему объему ( $0 < r < b$ ), где  $r = 0$  – координата оси или центра симметрии.

Для теоретического описания процесса повышения давления в объеме при нагреве запишем уравнения неразрывности, теплопроводности и состояния жидкости в линейном приближении [6, 7]:

$$\left(\frac{\partial p_1}{\partial t}\right) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho_1 v_1) = 0, \tag{6}$$

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \tag{7}$$

$$\rho_1 = \rho_{\ell 0} \left( 1 - \alpha^{(T)} (T_\ell - T_{\ell 0}) + \alpha^{(p)} (p - p_0) \right). \tag{8}$$

где  $\rho_\ell, \lambda_1, c_1, v_1, T_\ell, p$  – плотность, теплопроводность, теплоемкость, скорость, температура и давление жидкости, нижний индекс 0 здесь и далее соответствует начальным значениям параметров жидкости,  $\alpha^{(T)}$  – коэффициент термического расширения жидкости,  $\alpha^{(p)} = 1 / (p_{\ell 0} C_\ell^2)$  – коэффициент сжимаемости, определяемый скоростью звука в жидкости  $C_\ell$ ,  $n = 0, 1$  и  $2$  соответствует плоской, радиальной и сферической геометрии задачи.

Пусть в исходном состоянии ( $t < 0$ ) температура жидкости равна  $T_{\ell 0}$ , а давление  $p_0$ . С некоторого момента времени  $t = 0$  на границе  $r = b$  поддерживается постоянная температура  $T_e$ , которая выше начальной температуры  $T_{\ell 0}$ . При этом на оси симметрии емкости ( $r = 0$ ) выполняется условие отсутствия тепловых потоков  $\left(\frac{\partial T_\ell}{\partial r} = 0\right)$ .

При гипотезе однородности давления (условие гомобаричности  $\frac{\partial p}{\partial r} = 0$ ) из уравнения неразрывности (6) и теплопроводности (7) с учетом линейного уравнения состояния (8) можно получить

$$\alpha^{(p)} r^n \frac{dp}{dt} = \alpha^{(T)} v_\ell^{(T)} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \frac{\partial T_\ell}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} (r^n v_\ell), \tag{9}$$

где  $v_\ell^{(T)} = \lambda_\ell / [\rho_\ell c_\ell]$  – температуропроводность жидкости.

Учитывая, что скорость жидкости на границах  $r = 0$  и  $r = b$  равна нулю, интегрирование уравнения (9) по координате от 0 до  $b$  приводит к следующему дифференциальному уравнению для изменения давления жидкости:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(n+1) \alpha^{(T)} v_\ell^{(T)}}{\alpha^{(p)} b} \left( \frac{\partial T_\ell}{\partial r} \right) \Big|_{r=b}. \tag{10}$$

Для задания теплового потока на границе  $r = b$  необходимо найти решение уравнения теплопроводности, удовлетворяющее условиям  $T_\ell = T_{\ell 0}$  ( $t = 0, 0 < r < b$ ),  $\partial T_\ell / \partial r = 0$  ( $t > 0, r = 0$ ),  $T_\ell = T_e$  ( $T > 0, r = b$ ), подставляя в уравнение (10), для  $n = 0, 1$  и  $2$  соответственно получим:

$$p = p_0 + \frac{8 \alpha^{(T)} (T_e - T_{\ell 0})}{\alpha^{(p)} \pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \left[ 1 - e^{-v_\ell^{(T)} (2m+1)^2 \pi^2 t / (4b^2)} \right], \tag{11}$$

$$p = p_0 + \frac{4 \alpha^{(T)} (T_e - T_{\ell 0})}{\alpha^{(p)} b^2 \sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2} \left[ 1 - e^{-v_\ell^{(T)} \alpha_m^2 t} \right], \tag{12}$$

$$p = p_0 + \frac{6 \alpha^{(T)} (T_e - T_{\ell 0})}{\alpha^{(p)} \pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \left[ 1 - e^{-v_\ell^{(T)} m^2 \pi^2 t / b^2} \right]. \tag{13}$$

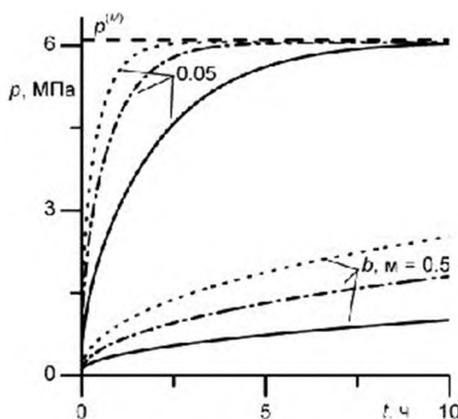
Следует отметить, что из решений (11)–(13) можно получить предварительные предельные оценки роста давления  $p(M)$  предельным переходом при  $t \rightarrow \infty$  или из уравнения состояния, полагая  $T_{\ell 0} = T_{\ell}$  и  $p_\ell = p_{\ell 0}$ .



$$\rho^{(M)} = \rho_0 + \frac{\alpha^{(T)}}{\alpha^{(p)}} (T_e - T_{\ell 0}). \tag{14}$$

В численных расчетах применительно к воде использовались следующие физические параметры [8]:  $\alpha^{(T)} = 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $\alpha^{(p)} = 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$ ,  $\nu_{\ell}^{(T)} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Для начального состояния приняты значения температуры и давления воды  $T_{\ell 0} = 293 \text{ K}$ ,  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ , температура на границе равна  $T_e = 353 \text{ K}$ .

На рисунке 1 представлены зависимости давления от времени, иллюстрирующие влияние линейных размеров замкнутого объема. Здесь и в дальнейшем сплошная, штрихпунктирная и точечная линии соответствуют случаям плоской, радиальной и сферической геометрии задачи. Штриховая линия, выполненная по формуле (14), соответствует величине максимального давления жидкости в замкнутом объеме.



**Рисунок 1** – Динамика роста давления вследствие термического расширения воды при различных значениях полуширины или радиуса  $b$

Видно, что при нагревании воды в замкнутой емкости, которая препятствует ее расширению, появляется давление на стенки, которое может привести к ее разрушению. Величина максимального давления не зависит от геометрического размера емкости, а зависит от начальных температур границы и воды. Геометрической размер емкости влияет на темп повышения давления.

Рассмотрим повышение давления нефтепродукта в замкнутом трубопроводе при термическом расширении.

Рассмотрим участок трубопровода, заполненный нефтепродуктом, который с двух сторон закрыт шаровыми кранами. Так как данный вид арматуры относится к классу герметичности А, то участок можно считать замкнутым.

Если участок трубопровода полностью заполнен жидкостью, находящейся под давлением  $p_1$ , и имеющей температуру  $T^1$ , то масса жидкости в нем рассчитывается следующим образом:

$$p_1 = p_{20} \left[ 1 + \xi(20 - T) - \frac{p_{\text{атм}} - p_1}{K} \right]. \tag{15}$$

Объем участка трубопровода будет равен:

$$V_1 = V_0 \left[ 1 + \alpha_T(20 - T) - \frac{d_0}{\delta E} (p_{\text{атм}} - p_1) \right], \tag{16}$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент теплового расширения металла;  $d_0$  – номинальный диаметр трубопровода;  $E$  – модуль Юнга;  $\delta$  – толщина стенки трубопровода.

Масса нефтепродукта равна:

$$M_1 = p_1 V_1 = p_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T) - \left( 1/K + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{\text{атм}} - p_1) \right]. \tag{17}$$

При повышении температуры от  $T_1$  до  $T_2$ , плотность  $\rho_2$  и объем  $V_2$  равны соответственно:

$$p_2 = p_{20} \left[ 1 + \xi(20 - T) - \frac{p_{\text{атм}} - p_2}{K} \right], \tag{18}$$



$$V_2 = V_0 \left[ 1 + \alpha_T(20 - T_2) - \frac{d_0}{\delta E} (p_{\text{атм}} - p_2) \right]. \tag{19}$$

Масса нефтепродукта равна:

$$M_2 = \rho_2 V_2 = \rho_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_2) - \left( 1/K + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{\text{атм}} - p_2) \right]. \tag{20}$$

Так как масса нефтепродукта величина постоянная, а это значит  $M_1 = M_2$ , получаем следующее равенство:

$$\begin{aligned} \rho_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_1) - \left( 1/K + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{\text{атм}} - p_1) \right] = \\ = \rho_0 V_0 \left[ 1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_2) - \left( 1/K + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{\text{атм}} - p_2) \right], \\ p_2 - p_1 = \frac{\xi - \alpha_T}{1/K + \frac{d_0}{\delta E}} (T_2 - T_1), \end{aligned} \tag{21}$$

$$p_2 = p_1 \left[ \frac{\xi - \alpha_T}{1/K + \frac{d_0}{\delta E}} (T_2 - T_1) \right]. \tag{22}$$

Таким образом полученная зависимость показывает, что при увеличении температуры, давление жидкости в трубопроводе увеличивается. Данная ситуация характерна для нефтебаз в весеннее время, когда температура окружающей среды при попадании прямых солнечных лучей может достигать 25 °C Цельсия, а разность температур в течение дня может достигать  $\Delta t = 20$  °C.

Рассмотрим случай из практики на примере дизельного топлива. На нефтебазу утром в железнодорожной цистерне прибывает дизельное топливо с температурой равной  $t = 7$  °C и плотностью  $\rho = 867,52$  кг/м<sup>3</sup> ( $K = 1,5 \times 10^9$  Па,  $\xi = 0,000673$ ). После этого дизельное топливо попадает в сливной коллектор ( $d = 219 \times 6$  мм,  $\alpha = 11,5 \times 10^{-6}$  K<sup>-1</sup>,  $E = 2 \times 10^{11}$  Па) с давлением равным:

$$p_1 = \rho gh,$$

где  $h$  – высота столба от зеркала нефтепродукта до нижней образующей сливного коллектора,  $h = 4,1$  м.

$$p_1 = 867,52 \cdot 9,81 \cdot 4,1 = 0,034893 \text{ МПа}.$$

После слива дизельного топлива в резервуар часть продукта остается в сливном коллекторе, после слива запорная арматура перекрывается (в нашем случае шаровый кран) и участок остается замкнутым. Так как в весеннее время разность температур в течение дня может достигать до  $\Delta t = 20$  °C, то в соответствии с зависимостью 22 определим рост давления в трубопроводе. Результаты расчета представлены в таблице 2 и на рисунке 2.

Таблица 2

$p_2$ , МПа	0,8185	1,6021	2,3857	3,1693	3,9530	4,7366	5,5202	6,3038	7,0874
$t_2$ , °C	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$\Delta t$ , °C	1	2	3	4	5	6	7	8	9

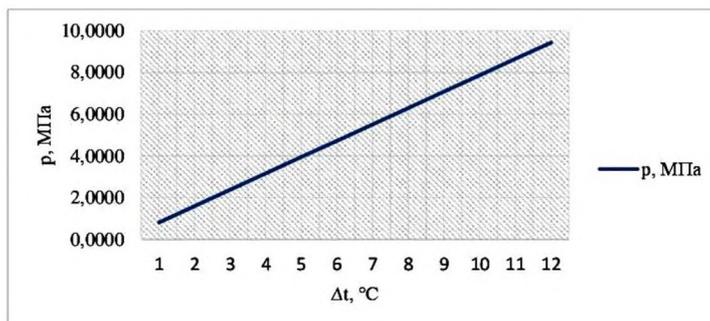


Рисунок 2 – График роста давления дизельного топлива в трубопроводе от изменения температуры



В результате расчетов можно сделать вывод, что при изменении температуры на 1 °С, давление в замкнутом трубопроводе возрастает на 0,7836 МПа или в 23,45 раза. Данная проблема является актуальной, особенно в весеннее время. Поэтому необходимо предусматривать мероприятия для борьбы с избыточным давлением в трубопроводе.

**Заключение.** В результате проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

Плотность нефти и нефтепродуктов и давление связаны тесно между собой. При повышении плотности происходит повышение давления в трубопроводе.

Тепловое расширение нефти и нефтепродуктов вызывает за собой увеличение объема продукта в замкнутом трубопроводе, а следовательно, и рост давления.

В результате резких изменений температуры наружного воздуха, в трубопроводах, заполненных продуктами, развиваются высокие давления, приводящие к разрыву задвижек или трубопроводов.

Шаровой кран относится к классу герметичности А, клиновая задвижка относится к классу В, то есть допускаются утечки при испытаниях воздухом давление 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального.

Определена зависимость повышения давления жидкости в замкнутом объеме при ее тепловом расширении.

При нагревании воды в замкнутой емкости, которая препятствует ее расширению, появляется давление на стенки, которое может привести к ее разрушению.

Величина максимального давления не зависит от геометрического размера емкости, а зависит от начальных температур границы и воды.

Геометрический размер емкости влияет на темп повышения давления.

Определена зависимость роста давления нефти и нефтепродуктов в замкнутом трубопроводе при расширении, которая показывает, что при увеличении температуры, давление жидкости в трубопроводе увеличивается на величину согласно зависимости 22.

Объединив вышесказанное можно сделать вывод, что при замене клиновых задвижек на шаровые краны в технологическом трубопроводе будет возникать избыточное давление, которое может привести к разрыву трубопровода. Рост давления будет возникать по причине теплового расширения жидкостей при резких изменения температуры (весенний-осенний период), а также в силу того, что шаровой кран принадлежит к классу герметичности А, что не означает отсутствие утечек жидкости. Данная проблема актуальна для складов хранения нефти и нефтепродуктов, особенно в весенне-осенний период, поэтому необходимо изучить данную проблему и разработать перечень мероприятий, предотвращающих возникновение аварийных ситуаций.

На основании проведенных аналитических расчетов были выявлены зависимости, определяющие на какую величину происходит повышение давления в замкнутом трубопроводе при тепловом расширении нефти и нефтепродуктов. В результате расчетов можно сделать вывод, что при изменении температуры на 1 °С, давление в замкнутом трубопроводе возрастает на 0,7836 МПа или в 23,45 раза.

#### Литература:

1. Трубопроводный транспорт нефти: в 2 т. / Сост.: Г.Г. Васильев, Г.Е. Коробков, А.А. Коршак, С.М. Вайшток. – М.: ООО «Недра Бизнесцентр», 2002. – Т. 1. – 407 с.
2. Кикоин А.К. Молекулярная физика / А.К. Кикоин, И.К. Кикоин; Под ред. В.А. Григорова. – М.: Наука, 1976. – 480 с.
3. Оленев Н.М. Хранение нефти. – Л.: Недра, 1964. – 436 с.
4. Машины и оборудование газонефтепроводов: учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-70.05.01. – 3-е изд., перераб. / Сост.: П.В. Коваленко, Н.Н. Пистуневич; Под общ. ред. П.В. Коваленко. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – 510 с.
5. Государственная система стандартизации Республики Беларусь. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов: ГОСТ 9544-2015. – Введ. 01.07.17. – Мн.: Госстандарт: Белорус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2017. – 56 с.
6. Краслоу Г. Теплопроводность твердых тел / Г. Краслоу, Д. Егер. – М.: Наука, 1964. – 487 с.
7. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. – М.: Наука, 1987. – Ч. 1. 464 с.
8. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972. – 720 с.

#### References:

1. Pipeline transportation of oil: at 2 toms / Comp.: G.G. Vasiliev, G.E. Korobkov, A.A. Korshak, S.M. Vaishtok. – M.: Nedra Business Center LLC, 2002. – V. 1. – 407 p.
2. Kikoin A.K. Molecular Physics / A.K. Kikoin, I.K. Kikoin; under the editorship of V.A. Grigorov. – M.: Nauka, 1976. – 480 p.
3. Olenev N.M. Oil storage. – L.: Nedra, 1964. – 436 p.
4. Machines and equipment for oil and gas pipelines: textbook. – method. complex for stud. specialist. 1-70.05.01. – 3rd edition, revised / Comp.: P.V. Kovalenko, N.N. Pistunovich; Under the total. ed. P.V. Kovalenko. – Novopolotsk: PSU, 2009. – 510 p.
5. The state system of standardization of the Republic of Belarus. Pipe fittings. Valves of tightness of locks: GOST 9544-2015. – Enter. 07/01/17. – Mn.: Gosstandart: Belorus. state Institute of Standardization and Certification, 2017. – 56 p.
6. Kraslow G. Thermal conductivity of solids / G. Kraslow, D. Eger. – M.: Nauka, 1964. – 487 p.
7. Nigmatulin R.I. Dynamics of multiphase media. – M.: Nauka, 1987. – Part 1. – 464 p.
8. Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids. – M.: Nauka, 1972. – 720 p.