

ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 532.1

ОЦЕНКА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА АВАРИЙНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ ПРИ УСТАНОВКЕ ШАРОВЫХ КРАНОВ

канд. тех. наук, доц. Л.М. СПИРИДЕНКО, В.В. КОЛЕСНИКОВИЧ
(Полоцкий государственный университет)

Рассматривается проблема возникновения аварийных ситуаций на технологических трубопроводах нефтебаз, выполненных наземно и надземно, при замене клиновых задвижек на шаровые краны, а также влияние теплового расширения жидкостей при изменении температуры. Анализируются факторы, влияющие на аварийность технологических трубопроводов, природа и физические свойства теплового расширения жидкости. Определены зависимость повышения давления жидкости в замкнутом объеме при ее тепловом расширении и зависимость повышения давления нефтепродуктов в замкнутом трубопроводе при тепловом расширении.

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

Введение. При реконструкции нефтебаз, а именно при замене на технологических трубопроводах клиновых задвижек на шаровые краны, возникают ситуации, приводящие к разрывам трубопровода и запорной арматуры. Статистика показывает ряд таких случаев, происшедших на нефтебазах разных компаний, расположенных на территории Республики Беларусь и за рубежом. Данные аварии происходят на технологических трубопроводах, выполненных наземно и надземно.

Целью исследования вопроса и причин, приводящих к разгерметизации трубопроводов, является изучение влияния шаровых кранов на герметичность технологических трубопроводов.

При исследовании были поставлены следующие задачи:

– определить причины, приводящие к росту давления в технологических трубопроводах, заполненных нефтепродуктом;

– проанализировать природу разрежений, определить ее взаимосвязь с внешними условиями.

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

Основная часть

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 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 – увеличивается. Зависимость плотности ρ (кг/м³) нефти от температуры T (°C) определяется формулой

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

где ρ_{20} – плотность нефти при температуре 20 °C;
 ξ (1/°C) – коэффициент объемного расширения.

При изменении давления плотность нефти также изменяется. Несмотря на то, что все нефти являются слабосжимаемыми жидкостями, изменение их плотности при изменении давления все же имеется. Плотность нефти при увеличении давления возрастает, а при уменьшении – 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 ρ (кг/м³) нефти от давления p представляется как

$$\rho(p) = \rho_{20} [1 + \beta(p - p_0)], \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность нефти при стандартных условиях (атмосферном давлении p_0 и температуре $+20\text{ }^\circ\text{C}$); β (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:

$$\rho(p) = \rho_{20} \left[1 + \frac{p - p_0}{K} \right]. \quad (3)$$

В случаях одновременного отклонения от номинальных значений и температуры, и давления, плотность $\rho(p, T)$ нефти при давлении p и температуре T можно рассчитывать по формуле [1]

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

Рассмотрим влияние теплового расширения нефти и нефтепродуктов.

Коэффициентом расширения называется доля единицы объема, на которую происходит расширение данного вещества при нагревании его на $1\text{ }^\circ\text{C}$.

Проанализируем расширение в жидкостях, влияние изменения температуры на изменение давления в заполненном нефтепродуктом трубопроводе.

Можно выделить две основных причины.

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.

В действительности молекулы совершают ангармонические (т.е. негармонические) 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 негармоничность колебаний молекул.

Во-вторых, в жидкости существуют микропустоты – пространства, где отсутствуют молекулы. При нагревании жидкости концентрация этих микропустот 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:

$$V_1 = V_0 [1 + \xi(t)], \quad (5)$$

где V_1 – конечный объем при температуре t ;

V_0 – объем жидкости при $0\text{ }^\circ\text{C}$;

ξ – 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 на аварийность технологических трубопроводов при их установке.

Кран – запорное устройство, в котором подвижная деталь затвора (пробка) имеет форму тела вращения с отверстием для пропуска 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 четвертьоборотными 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 загрязнениям легче проникнуть в уплотнение и повредить их. В четвертьоборотных ventилях уплотнения в зависимости от типа ventиля остаются в течение всего времени работы защищенными [4].

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

Таблица. – 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

Таким образом, герметичность шарового крана относится к классу А, клиновой задвижки – к классу В, т.е. допускаются утечки при испытаниях воздухом с давлением 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального.

Аналитическое выражение роста давления в трубопроводе при тепловом расширении жидкости. При анализе разрывов технологических трубопроводов после замены клиновых задвижек на шаровые краны были проанализированы следующие причины: физико-химические свойства нефти и нефтепродуктов, тепловое расширение нефти и нефтепродуктов, конструктивные особенности шарового крана. В результате было установлено, что наиболее вероятной причиной является тепловое расширение 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:

$$\left(\frac{\partial \rho_l}{\partial t}\right) + \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \rho_l v_r) = 0, \quad (6)$$

$$\rho_l c_l \frac{\partial T_l}{\partial t} = \frac{\lambda_l}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^n \frac{\partial T_l}{\partial r} \right), \quad (7)$$

$$\rho_l = \rho_{l0} (1 - \alpha^{(T)} (T_l - T_{l0}) + \alpha^{(p)} (p - p_0)). \quad (8)$$

где $\rho_b, \lambda_b, c_b, v_b, T_b, p$ – 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;

$\alpha^{(p)} = 1/(\rho_{i0} C_i^2)$ – коэффициент сжимаемости, определяемый скоростью звука в жидкости C_i ;

$n = 0, 1$ и 2 соответствует плоской, радиальной и сферической геометрии задачи.

Пусть в исходном состоянии ($t < 0$) температура жидкости равна T_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_0 . При этом на оси симметрии емкости ($r = 0$) выполняется условие отсутствия тепловых потоков ($\frac{\partial T_i}{\partial r} = 0$).

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

$$\alpha^{(p)} r^n \frac{dp}{dt} = \alpha^{(T)} v_i^{(T)} \frac{\partial}{\partial r} (r^n \frac{\partial T_i}{\partial r}) - \frac{\partial}{\partial r} (r^n v_i), \quad (9)$$

где $v_i^{(T)} = \lambda_i / (\rho_i c_i)$ – 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:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(n+1)\alpha^{(T)} v_i^{(T)}}{\alpha^{(p)} b} \left(\frac{\partial T_i}{\partial r} \right) \Big|_{r=b}. \quad (10)$$

Для задания теплового потока на границе $r = b$ необходимо найти решение уравнения теплопроводности, удовлетворяющее условиям $T_i = T_0$ ($t = 0, 0 < r < b$), $\partial T_i / \partial r = 0$ ($t > 0, r = 0$), $T_i = T_e$ ($t > 0, r = b$). Подставив их в уравнение (10), для $n = 0, 1$ и 2 соответственно получим:

$$p = p_0 + \frac{8\alpha^{(T)}(T_e - T_0)}{\alpha^{(p)}\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^2} \left[1 - e^{-v_i^{(T)}(2m+1)^2 \pi^2 t / (4b^2)} \right], \quad (11)$$

$$p = p_0 + \frac{4\alpha^{(T)}(T_e - T_0)}{\alpha^{(p)} b^2 \sqrt{\pi}} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\alpha_m^2} \left[1 - e^{-v_i^{(T)} \alpha_m^2 t} \right], \quad (12)$$

$$p = p_0 + \frac{6\alpha^{(T)}(T_e - T_0)}{\alpha^{(p)}\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{m^2} \left[1 - e^{-v_i^{(T)} m^2 \pi^2 t / b^2} \right]. \quad (13)$$

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 $T_i = T_0$ и $\rho_i = \rho_0$.

$$p^{(M)} = p_0 + \frac{\alpha^{(T)}}{\alpha^{(p)}} (T_e - T_0). \quad (14)$$

В численных расчетах применительно к воде использовались следующие физические параметры [8]: $\alpha^{(T)} = 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $\alpha^{(p)} = 10^{-9} \text{ Па}^{-1}$, $v_i^{(T)} = 1,3 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$. Для начального состояния приняты значения температуры и давления воды $T_0 = 293 \text{ К}$, $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, температура на границе равна $T_e = 353 \text{ К}$.

На рисунке представлены зависимости давления от времени, иллюстрирующие влияние линейных размеров замкнутого объема. Здесь 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.

При нагревании воды в замкнутой емкости, которая препятствует ее расширению, появляется давление на стенки, которое может привести к ее разрушению. Величина максимального давления не зави-

сит от геометрического размера емкости, а зависит от начальных температур границы и воды. Геометрической размер емкости влияет на темп повышения давления.

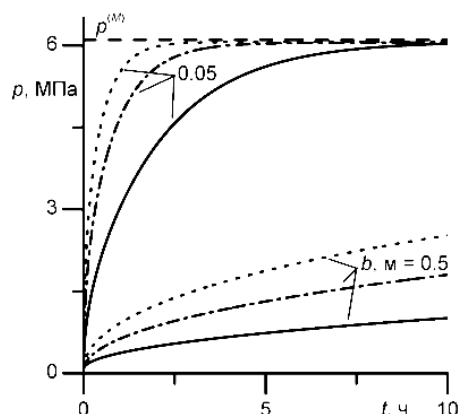


Рисунок. – Динамика роста давления вследствие термического расширения воды при различных значениях полуширины или радиуса b

Рассмотрим повышение давления нефтепродукта в замкнутом трубопроводе при термическом расширении.

Участок трубопровода, заполненный нефтепродуктом, который с двух сторон закрыт шаровыми кранами. Данный вид арматуры относится к классу герметичности А, поэтому 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:

$$\rho_1 = \rho_{20} \left[1 + \xi(20 - T) - \frac{p_{амм} - p_1}{K} \right]. \quad (15)$$

Объем участка трубопровода будет равен

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

где α_T – коэффициент теплового расширения металла;

d_0 – номинальный диаметр трубопровода;

E – модуль Юнга;

δ – толщина стенки трубопровода.

Масса нефтепродукта

$$M_1 = \rho_1 V_1 = \rho_0 V_0 \left[1 + (\xi - \alpha_T)(20 - T_1) - \left(\frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E} \right) (p_{амм} - p_1) \right]. \quad (17)$$

При повышении температуры от T_1 до T_2 плотность ρ_2 и объем V_2 равны соответственно

$$\rho_2 = \rho_{20} \left[1 + \xi(20 - T_2) - \frac{p_{амм} - p_2}{K} \right], \quad (18)$$

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

Масса нефтепродукта

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

Масса нефтепродукта – величина постоянная, следовательно, $M_1 = M_2$. Тогда

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

$$p_2 = p_1 + \frac{\xi - \alpha_T}{\frac{1}{K} + \frac{d_0}{\delta E}}. \quad (22)$$

Полученная зависимость показывает, что при увеличении температуры давление жидкости в трубопроводе увеличивается.

Заключение. По результатам проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Плотность нефти и нефтепродуктов и давление тесно связаны между собой. При повышении плотности происходит повышение давления в трубопроводе.
2. Тепловое расширение нефти и нефтепродуктов вызывает увеличение объема продукта в замкнутом трубопроводе, а следовательно, и рост давления.
3. В результате резких изменений температуры наружного воздуха в трубопроводах, заполненных продуктами, развиваются высокие давления, приводящие к разрыву задвижек или трубопроводов.
4. Шаровой кран относится к классу герметичности А, клиновая задвижка – к классу В, т.е. допускаются утечки при испытаниях воздухом с давлением 0,6 МПа или водой с давлением, равным 1,1 от номинального.

Таким образом, при замене клиновых задвижек на шаровые краны в технологическом трубопроводе будет возникать избыточное давление, которое может привести к разрывам трубопровода. Рост давления обусловлен тепловым расширением жидкостей при резких изменениях температуры (весенне-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.

По результатам проведенных аналитических вычислений можно сделать следующие выводы:

1. Определена зависимость повышения давления жидкости в замкнутом объеме при ее тепловом расширении.
2. При нагревании воды в замкнутой емкости, которая препятствует ее расширению, появляется давление на стенки, которое может привести к ее разрушению.
3. Величина максимального давления не зависит от геометрического размера емкости, но зависит от начальных температур границы и воды.
4. Геометрической размер емкости влияет на темп повышения давления.
5. 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).

На основании проведенных аналитических расчетов были выявлены зависимости, определяющие величину повышения давления в замкнутом трубопроводе при тепловом расширении нефти и нефтепродуктов. На основании полученных выводов будут произведены практические расчеты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трубопроводный транспорт нефти : в 2 т. / сост.: Г.Г. Васильев [и др.]. – М. : 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 / Н.М. Оленев. – Л. : Недра, 1964. – 436 с.
4. Машины и оборудование газонефтепроводов : учеб.-метод. комплекс / сост. П.В. Коваленко, Н.Н. Пистуневич ; под общ. ред. П.В. Коваленко. – 3-е изд., перераб. – Новополюк : ПГУ, 2009. – 510 с.

5. Государственная система стандартизации Республики Беларусь. Арматура трубопроводная. Нормы герметичности затворов : ГОСТ 9544-2015. – Введ. 01.07.17. – Минск : 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 : в 2 ч. / Р.И. Нигматулин. – М. : Наука, 1987. – Ч. 1. – 464 с.
8. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М. : Наука, 1972. – 720 с.

Поступила 28.11.2019

ASSESSMENT OF FACTORS INFLUENCING THE EMERGENCY OF TECHNOLOGICAL PIPELINES WHEN INSTALLING BALL VALVES

L. SPIRIDENOK, V. KOLESNIKOVICH

The article discusses the problem of emergencies at technological pipelines of oil depots, made above-ground, when replacing wedge gate valves with ball valves. The purpose of the study is identified. The authors determined 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 factors affecting the breakdown rate of technological pipelines, the nature and physical properties of thermal expansion of a liquid. The authors considered the problem of emergencies at technological pipelines of oil depots made in the above-ground version, and also the effect of thermal expansion of liquids with temperature. The article defines the dependence of the increase in liquid pressure in a closed volume during its thermal expansion and the dependence of the increase in oil pressure in a closed pipeline during thermal expansion.

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