

УДК 621.643.03:620.178.4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО РАСШИРЕНИЯ УЧАСТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТРУБОПРОВОДА

Д.Н. Лазовский, А.В. Поправко, В.А. Бодряков

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь
e-mail: d.lazovski@psu.by, a.poppravko@psu.by, bodriakov.vlad@gmail.com

Проведены экспериментально-теоретические исследования линейного температурного расширения участка технологического трубопровода с отводом с получением результатов характера деформирования стали трубы отвода при действии статической нагрузки.

Ключевые слова: участок технологического трубопровода с отводом, тепловое расширение материалов, характер деформирования стали.

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDY OF LINEAR THERMAL EXPANSION OF A SECTION OF TECHNOLOGICAL PIPELINE

D. Lazovsky, A. Popravko, V. Bodryakov

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus
e-mail: d.lazovski@psu.by, a.poppravko@psu.by, bodriakov.vlad@gmail.com

Experimental and theoretical studies of the linear temperature expansion of a section of a process pipeline with a branch were carried out, obtaining results of the nature of deformation of the steel of the branch pipe under the action of a static load.

Keywords: section of a process pipeline with a branch, thermal expansion of materials, nature of steel deformation.

Введение. Тепловое расширение материалов возникает при повышении температуры и в стесненных условиях вызывает появление усилий, приводящих, в ряде случаев, к разрушениям и аварийным ситуациям. Это явление учитывается в технике, в частности, в строительстве (ограничение длины температурных блоков надземной части зданий, компенсационные швы между конструкциями из материалов с разными коэффициентами температурного расширения, устройство компенсаторов на подвижных опорах трубопроводов и т.п.).

При строительстве промышленного объекта, связанного стальными технологическими трубопроводами с существующими объектами, увеличение температуры продукта на участке трубопровода до 285°C вызвало его линейное температурное расширение, в результате которого произошел упор одного из отводов в неподвижное препятствие и его разрушение в месте соединения с технологическим трубопроводом.

Цель настоящей работы: с помощью компьютерного моделирования и лабораторных испытаний установить возможность его разрушения при действии статического усилия при действии постоянных (собственный вес трубопровода, его изоляции) и временных нагрузок (продукта в трубопроводе, сил трения на промежуточных подвижных опорах, температурного воздействия).

Объектом моделирования является участок стального трубопровода с отводом между двумя неподвижными опорами с одним пространственным компенсаторным изгибом в середине его длины.

Для установления возможности его разрушения при статическом действии постоянных и временных воздействий были решены следующие задачи:

- разработка модели участка технологического трубопровода с отводом в месте врезки с задвижкой;
- сбор нагрузок, включая силовые и температурные воздействия [1; 2];
- выполнение статического расчета, в т.ч. на ЭВМ с использованием компьютерных программ, для вычисления внутренних усилий в месте врезки отвода технологического трубопровода;
- прочностной и деформационный расчеты отвода с учетом физико-механических характеристик стали при расчетном температурном воздействии;
- лабораторное испытание отвода с фрагментом стального трубопровода в натуральную величину для верификации методики прочностного и деформационного расчетов;
- анализ результатов экспериментально-теоретического исследования линейного температурного расширения участка технологического трубопровода.

Расчетная модель. Согласно [3] в рассматриваемой задаче допускаемые перемещения трубопровода вследствие силового и температурного воздействия определяется исходя из конструктивного принципа – соблюдения необходимых зазоров между трубопроводом и прочим оборудованием.

В соответствии с параметрами согласно [3] рассматриваемый участок технологического трубопровода относится к категории среднетемпературных трубопроводов из углеродистой стали (расчетная температура $285^{\circ}\text{C} > 370^{\circ}\text{C}$) с внутренним избыточным давлением $0\text{МПа} \geq 2,53\text{МПа} \geq 10\text{МПа}$.

В принятой расчетной схеме рассматриваемый участок технологического трубопровода моделируется балочными конечными элементами как статически неопределимая пространственная упругая стержневая система (п. 8.1.1 [3]) с неподвижными опорами по концам, ограничивающими линейные перемещения трубопровода по всем трем осям, и одиннадцатью скользящими опорами, которые ограничивают перемещения трубопровода по вертикали. В расчетной схеме трубопровод разбивается на жестко связанные между собой по длине прямолинейные и криволинейные по окружности изгиба оси трубопровода участки. В принятой расчетной модели повышенная податливость на изгиб криволинейных участков трубопровода (эффект Кармана) учитывается моделью автоматически.

Расчетная модель отвода в месте врезки моделируется балочными стержневыми элементами с переменными по длине жесткостями на различных участках. Длина участков принимается равной длине соколета и ниппеля, задвижки и заглушки. Жесткости задаются параметрически в соответствии с их размерами поперечного сечения и модулем упругости стали.

Жесткостные характеристики сечения трубопровода и отвода задаются параметрически наружным диаметром и толщиной стенки, модулем упругости стали. В принятой расчетной схеме модуль упругости стали принимается в соответствии с расчетной температурой по марочнику сталей [4].

При моделировании на скользящих опорах учитываются силы трения по направлениям возможного смещения трубопровода методом последовательных приближений.

Расчетные модели рассматриваемого участка технологического трубопровода и отвода в месте врезки представлены на рисунке 1 и рисунке 2.

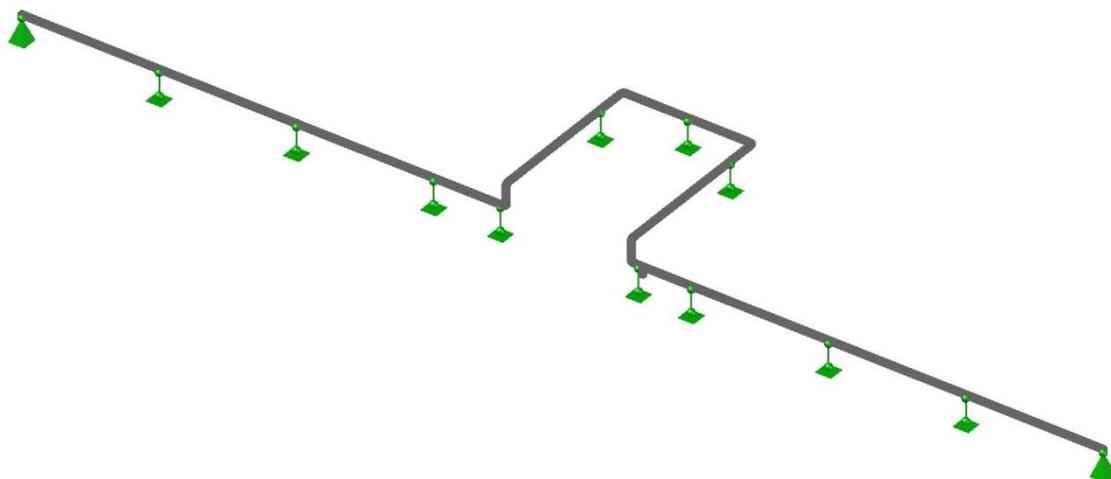


Рисунок 1. – Расчетная модель рассматриваемого участка технологического трубопровода

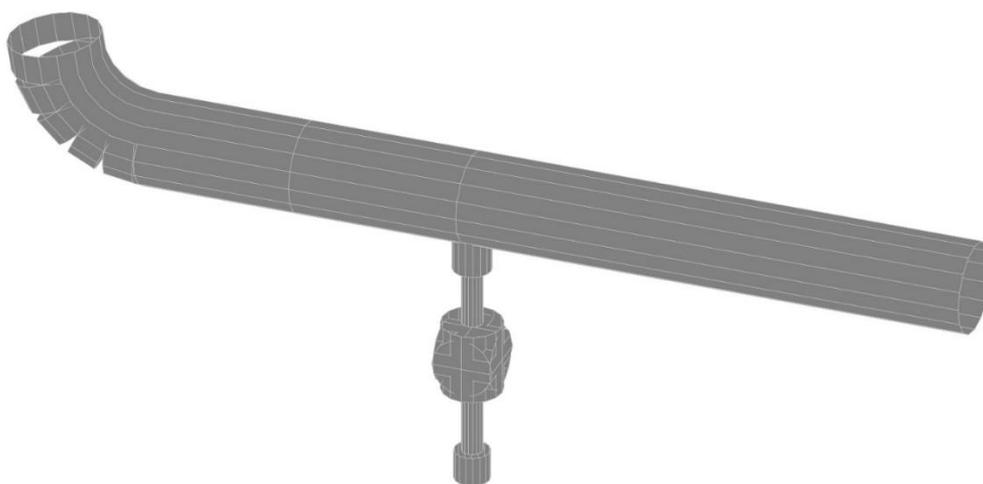


Рисунок 2. – Расчетная модель отвода в месте врезки

Силовые и температурные воздействия. Силовые и температурные воздействия в принятой расчетной модели определяются в соответствии с [1–3]. Собственный вес трубопровода диаметром 114,3мм с толщиной стенки 6,02мм и удельным весом стали с учетом расчетной температуры 285°C, равным согласно [4] 7775кг/м³, принимается в виде равномерно распределенной нагрузки по длине трубопровода с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma=0,95<1$ (уменьшение нагрузки ухудшает условия работы трубопровода).

Собственный вес изоляции технологического трубопровода – типа ЕТ толщиной 120мм и объемным весом 120кг/м³ принимается в виде равномерно распределенной нагрузки по длине трубопровода. Коэффициент надежности по нагрузке $\gamma=0,9$.

Собственный вес продукта (дизельное топливо удельным весом 860кг/м³) принимается в виде равномерно распределенной нагрузки по длине трубопровода с коэффициентом надежности по нагрузке $\gamma=1$.

Расчетный температурный перепад определяется как разность между расчетной температурой ($t=285^{\circ}\text{C}$) и монтажной температурой стенок технологического трубопровода ($t_n=20^{\circ}\text{C}$). Коэффициент надежности $\gamma=1$. Коэффициент линейного температурного расширения стали трубы при расчетной температуре 285°C равен $13 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$ [4].

Горизонтальные составляющие воздействия от сил трения на подвижных опорах трубопровода вычисляются из условия:

$$\sqrt{(Q_x^2 + Q_y^2)} = \mu \cdot Q_z, \quad (1)$$

где Q_x , Q_y и Q_z – соответственно боковые составляющие силы трения вдоль и поперек оси трубопровода и вертикальное давление трубопровода на подвижную опору;

$\mu=0,3$ – коэффициент трения на скользящей опоре.

Компоненты силы трения Q_x и Q_y на перемещениях в плоскости скольжения должны совершать отрицательную работу (т.е. каждая пара значений Q_x, Δ_x и Q_y, Δ_y должна иметь противоположные знаки).

Компоненты силы трения Q_x и Q_y определяют последовательными приближениями в зависимости от перемещений трубопровода Δ_x и Δ_y , вычисленных на каждом этапе расчета. Вертикальное давление трубопроводов от действующих нагрузок на подвижные и опоры вычисляется как опорные реакции в месте скользящих опор в зависимости от расстояния между ними.

Усилие в расчетной модели отвода в месте его врезки в трубопровод принимается в виде сосредоточенного усилия на уровне неподвижной опоры, в которую произошло его опирание при линейном температурном деформировании.

Результаты статического расчета. В результате статического расчета вычислены горизонтальные перемещения вдоль оси трубопровода Δ_x , поперек его оси Δ_y и суммарное перемещение Δ трубопровода при действующих силовых и температурных воздействиях в месте упора отвода.

Для установления влияния сил трения при смещении на скользящих опорах технологического трубопровода от расчетного температурного воздействия выполнены расчеты на действие собственного веса, изоляции и продукта в трубопроводе в двух вариантах: 1) с учетом действия сил трения в месте расположения скользящих опор; 2) без учета сил трения.

Для оценки характера зависимости линейных перемещений Δ_x и Δ_y от расчетной разницы температур вследствие изменения направления суммарного перемещения Δ точки отвода на уровне горизонтальной оси задвижки из-за влияния пространственного компенсатора и сил трения на скользящих опорах, построены графики перемещений этой точки вдоль оси трубопровода Δ_x , поперек оси Δ_y в зависимости от расчетной разницы температур (рисунок 3).

Прочностной и деформационный расчеты отвода. Расчет поперечного усилия P в месте упора отвода в неподвижную опору на расстоянии e от места соединения, при котором произошел разрыв стенки трубы отвода в месте соединения с трубопроводом, производится из условия:

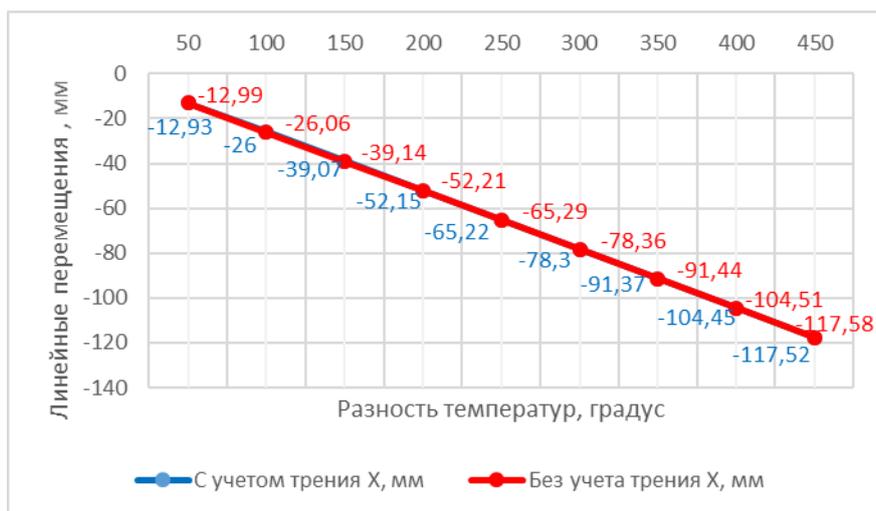
$$P = \frac{\sigma_{u,t} \cdot W_p}{e}, \quad (2)$$

где W_p – пластический момент сопротивления поперечного сечения трубы отвода (учитывая пластическую работу стали трубы перед разрушением);

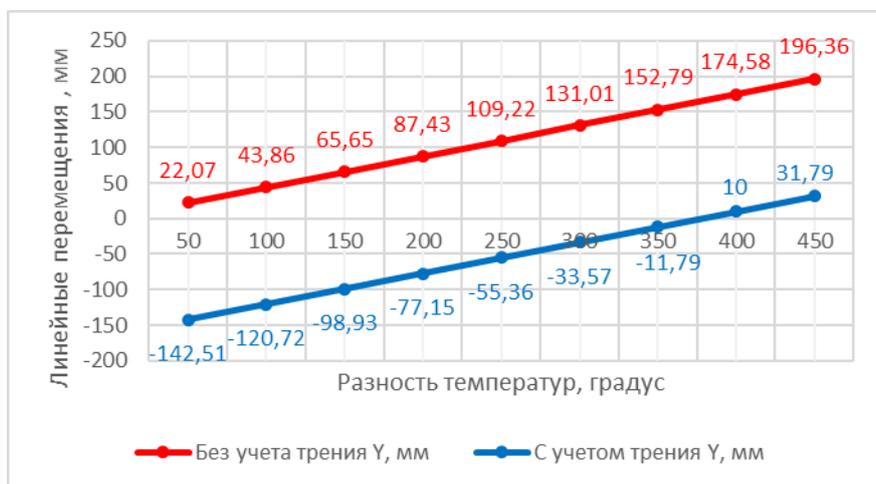
$\sigma_{u,t}$ – временное сопротивление разрыву трубы из Ст20 наружным диаметром 26,7мм с толщиной стенки 5,56мм с учетом расчетной температуры 285°C [4].

Расчетное поперечное усилие разрыва стенки трубы отвода в месте ее соединения с трубопроводом составляет 7,6кН.

а)



б)



а) вдоль оси трубопровода Δx; б) поперек оси Δy

Рисунок 3. – Графики перемещений точки отвода на уровне горизонтальной оси задвижки в зависимости от расчетной разницы температур:

Используя расчетную модель отвода, вычислены перемещения точки его возможного соприкосновения с неподвижной опорой. Модуль деформаций для Ст20 принят по расчетным параметрам стали трубы отвода при ее разрыве с учетом расчетной температуры 285°C [4]:

$$E_t = \frac{\sigma_{u,t}}{\epsilon_{u,t}} = \frac{413,5}{28,85 / 100} = 1,433 \cdot 10^3 \text{ МПа},$$

где относительное удлинение стали при разрыве при расчетной температуре 285°C [4] $\epsilon_u = \delta_5 = 28,85\%$.

Анализ результатов моделирования. Величина горизонтального перемещения отвода вдоль оси трубопровода в месте его упора в неподвижную опору составляет: при комбинации загружений варианта 1 (с учетом трения) $\Delta x=69,146\text{мм}$; при комбинации загружений варианта 2 (без учета трения) $\Delta x=69,21\text{мм}$ (рисунок 4).

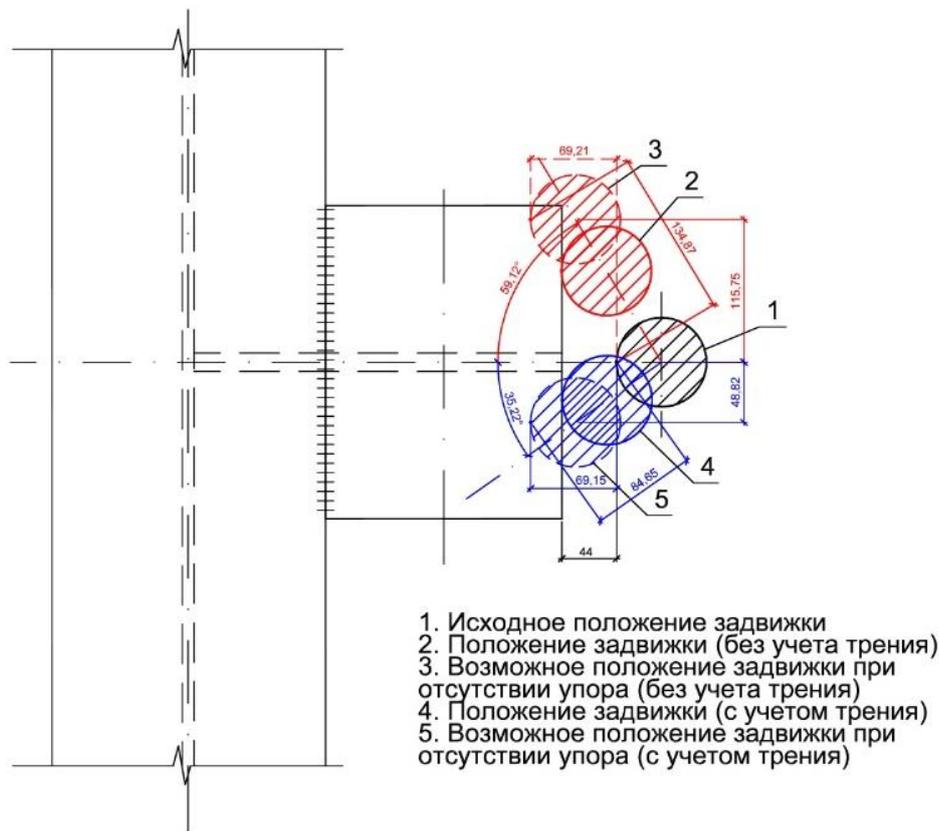


Рисунок 4. – Величина горизонтального перемещения отвода вдоль оси трубопровода в месте его упора в неподвижную опору

Расчетное расстояние в свету между отводом при линейном температурном расширении технологического трубопровода при заданных параметрах при самой неблагоприятной расчетной комбинации загружений (собственный вес трубопровода, изоляции, продукта внутри трубопровода, расчетного температурного воздействия без учета трения на скользящих опорах (вариант 2)) превышает фактическое на $69,21-44=25,21\text{мм}$.

Влияние сил трения сказывается на величине и направлении горизонтального перемещения поперек оси трубопровода вследствие ограничения возможности перемещения трубопровода поперек его оси на скользящих опорах пространственного компенсатора.

Расчетное значение поперечного усилия P , приложенного в месте упора в неподвижную опору составляет $P=7,6\text{кН}$. Соответствующее горизонтальное перемещение отвода в этом месте, при котором произошел разрыв стенки трубы, равно $\Delta=213\text{мм}$.

Если предположить, что труба отвода от места приварки к трубопроводу до упора при пуске продукта не успела нагреться до расчетной температуры, то перемещение отвода вычисляется при исходных параметрах стали. В этом случае расчетное значение поперечного усилия $P=8,5\text{кН}$, а соответствующее горизонтальное перемещение отвода, при котором произошел разрыв стенки трубы $\Delta=156\text{мм}$.

Таким образом, учитывая податливость при изгибе отвода в месте врезки при достижении временного сопротивления металлом трубы отвода (начало разрушения), величина линейного расширения технологического трубопровода должна была бы составлять $(156+44=200\text{мм})$, а расчетное значение линейного перемещения рассматриваемой точки при заданных параметрах составляет 69,21мм. Расчетный запас по возможному линейному перемещению в сторону опоры трубопровода в месте крепления отвода до разрушения трубы составляет более 130мм.

Лабораторное испытание. Опытный образец в натуральную величину участка трубопровода представляет собой отрезок стальной трубы наружным диаметром 114,3мм, приваренным к нему соколетом длиной 40мм и отводом диаметром 26,7мм с задвижкой, установленной на расстоянии 80мм от соколета и заглушкой в торце отвода. Внешний вид опытного образца приведен на рисунке 5.



Рисунок 5. – Внешний вид опытного образца

Опытный образец вертикально фиксировался между подушками пресса П-125. Сосредоточенное усилие создавалось механическим домкратом грузоподъемностью 12,5кН, установленным на нижнюю подушку пресса. Направление вертикального сосредоточенного усилия, создаваемого домкратом – снизу вверх. Для измерения величины сосредоточенного усилия между домкратом и точкой приложения сосредоточенного усилия на отводе устанавливался эталонный динамометр с индикатором часового типа (цена деления 0,01мм). Точечное приложение вертикального усилия к отводу на расстоянии 277мм от оси трубопровода обеспечивалось специально сконструированным и изготовленным приспособлением в виде втулки с отверстием под стальной шарик диаметром 15мм, через который передавалось усилие на шту-

цер от динамометра. Приспособление в виде втулки фиксировалось от возможного поворота вокруг оси отвода при испытании с помощью болта. Кроме того, названное приспособление фиксировалось с помощью втулки и заглушки от возможного перемещения вдоль оси отвода точки приложения усилия (стального шарика) при испытании. Для измерения перемещения (отклонения) отвода в месте приложения сосредоточенного усилия применялся прогибомер часового типа ПАО-6 с точностью до 0,01мм.

Для нагрева до расчетной температуры 285°C места стыка образца участка трубопровода с отводом применялись газовые горелки в количестве двух штук, установленных с двух сторон образца и направленных на место стыка сбоку. Значение температуры контролировалось с помощью инфракрасного термометра Testo 830-T2 (точность измерения $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$) на каждом этапе нагружения.

Лабораторное испытание образца участка трубопровода с отводом статической сосредоточенной силой на расстоянии 277мм от оси трубопровода проводили при температуре воздуха в лаборатории 18°C. Общий вид лабораторного испытания образца участка трубопровода с отводом представлено на рисунке 6.



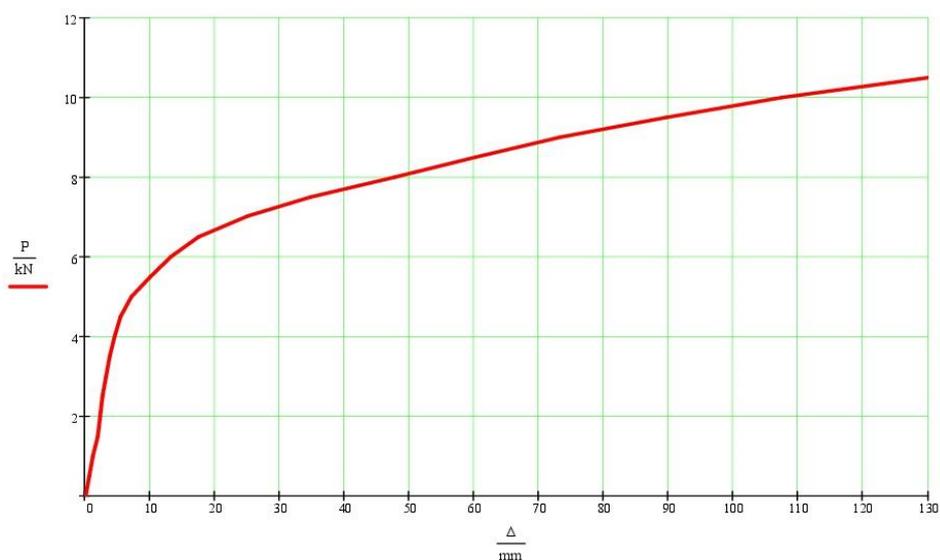
Рисунок 6. – Общий вид лабораторного испытания образца участка трубопровода с отводом

Нагружение опытного образца осуществлялось этапами по 0,5кН. Время выдержки при постоянной нагрузке составляло 2 минуты. На каждом этапе нагружения снимали показания прогибомера, фиксирующего перемещение отвода, и измеряли температуру отвода в месте стыка (рисунок 7). Форма графика зависимости перемещения точки приложения сосредоточенного усилия Δ на отводе от приложенного усилия P аналогична диаграмме деформирова-

ния Ст20 при работе на растяжение и свидетельствует о пластическом характере деформирования стали трубы отвода. График температуры t ($^{\circ}\text{C}$) на этапах нагружения свидетельствует о постоянной температуре металла в зоне стыка со средним значением $284,6^{\circ}\text{C}$ при максимальном отклонении $3,4^{\circ}\text{C}$.

В процессе проведения лабораторного испытания не удалось достичь хрупкого разрушения стальной трубы отвода в месте стыка. До $P=5\text{кН}$ металл трубы отвода работает упруго (наклонная прямая линия). При более высоком значении усилия начинают появляться пластические деформации (линия искривляется). После достижения максимального значения статической сосредоточенной нагрузки $10,5\text{кН}$ образец пластично деформировался при уменьшающейся нагрузке и при нагрузке $9,5\text{кН}$ испытания были остановлены. Внешний вид образца участка трубопровода с отводом после испытания представлен на рисунке 8.

а)



б)

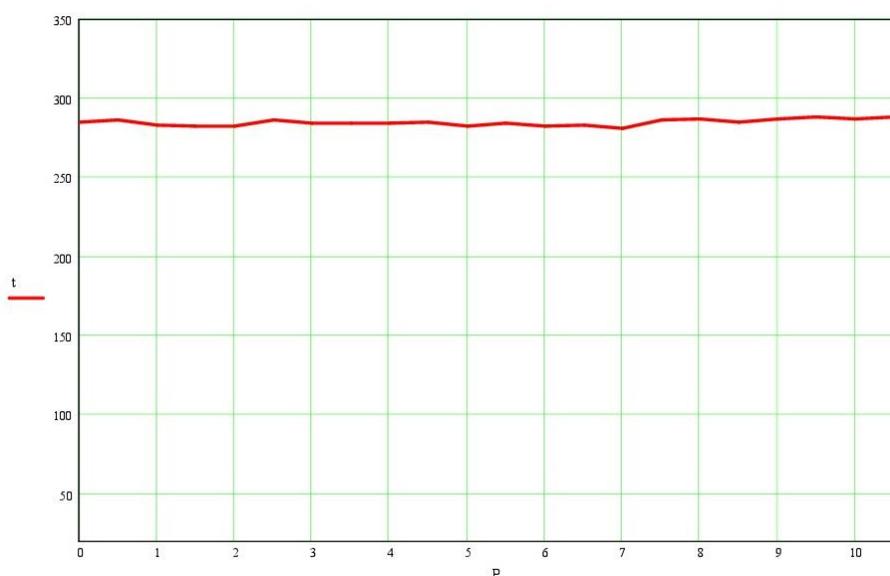


Рисунок 7. – График зависимости перемещения точки приложения сосредоточенного усилия Δ на отводе от приложенного усилия P (а) и график температуры t ($^{\circ}\text{C}$) в зоне стыка отвода на этапах нагружения (б)



Рисунок 8. – Внешний вид образца участка трубопровода с отводом после испытания

Визуальный осмотр образца участка трубопровода с отводом после испытания показал, что произошло пластическое разрушение участка трубы отвода длиной 80мм между соколетом и задвижкой при ее изгибе. Измерение угла загиба участка трубы после разгрузки показало, что он составляет 45° . При этом перемещение точки приложения сосредоточенного усилия составляет 130мм.

Сопоставление результатов лабораторного испытания натурального образца участка трубопровода с отводом показывает удовлетворительную сходимость с результатами моделирования. Расхождения в величинах разрушающей нагрузки при испытании $P_{изм}=10,5\text{кН}$ против $P_{расч}=8,5(7,6)\text{кН}$ в большую сторону от расчетных и величинах перемещений отвода в месте приложения сосредоточенного усилия $\Delta_{изм}=129,86\text{мм}$ против $\Delta_{расч}=213\text{мм}$ в меньшую сторону от расчетных можно объяснить влиянием утолщений по концам трубы отвода длиной 80мм (составляет $80/26,7=3$ диаметра) в виде соколета и задвижки, что стесняло свободные деформации участка трубы отвода и уменьшало значения пластической деформации.

Заключение. На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Экспериментально-теоретические исследования линейного температурного расширения участка технологического трубопровода с отводом подтверждают пластический характер деформирования стали трубы отвода при действии статической нагрузки.

2. Отклонение стальной трубы отвода от исходного положения вследствие линейного температурного расширения технологического трубопровода не могли служить причиной ее разрыва в месте соединения с трубопроводом при статическом (постепенном) увеличении поперечного усилия в месте упора отвода в неподвижную опору.

ЛИТЕРАТУРА

1. СН 2.01.02-2019 Воздействия на конструкции. Объемный вес, собственный вес, функциональные нагрузки для зданий. – Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск. – 2020. – 33 с.
2. СН 2.01.06-2019 Воздействия на конструкции. Общие воздействия. Температурные воздействия. – Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск. – 2020. – 27 с.
3. ГОСТ 32388-2013 «Трубопроводы технологические. Нормы и методы расчета на прочность, вибрацию и сейсмические воздействия». – Стандартинформ Российской Федерации. – Москва. – 2016. – 108 с.
4. Марочник сталей и сплавов. 4-е изд., переработ. и доп. / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский, А.С. Зубченко – Москва. – 2014. – 1216 с.