

УДК 624.042.12

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДЗЕМНЫХ БЕСКАНАЛЬНЫХ, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ТЕРМИЧЕСКИ НАПРЯЖЕННЫХ, ТЕПЛОПРОВОДОВ СО СТАРТОВЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ

Белиловец Виталий Игоревич<sup>1</sup>,  
vitaliy.belilovec@mail.ru

Липовка Юрий Львович<sup>1</sup>,  
lipovka.j.l@gmail.com

<sup>1</sup> Сибирский федеральный университет,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79.

**Актуальность.** Значимым направлением в теплоснабжении является проектирование подземных бесканальных тепловых сетей, которые позволяют существенно снизить капиталовложения по сравнению с надземными или полностью канальными сетями. Использование оптимального количества стартовых компенсаторов позволяет проектировать протяженные прямолинейные участки подземных бесканальных теплопроводов. В настоящее время проектирование и строительство предварительно термически напряженных бесканальных трубопроводов тепловых сетей вызывает существенные вопросы у специалистов. Современной специализированной литературы по данному направлению не так много. Бесканальная прокладка требует более строгого внимания к решению вопросов компенсации температурных расширений. Таким образом, уточненные методы расчета компенсации температурных расширений труб и применение бесканального способа прокладки участков тепловых сетей позволяют экономить десятки миллионов рублей.

**Цель:** разработка методики расчета компенсации температурных расширений подземных бесканальных, предварительно термически напряженных, стальных трубопроводов водяных тепловых сетей со стартовыми компенсаторами.

**Методы:** математическое моделирование напряженно-деформированного состояния участка бесканального теплопровода со стартовыми компенсаторами; численное решение тестовой задачи для участка теплопровода с известными характеристиками с использованием разработанной методики.

**Результаты.** Предложена методика расчета подземных бесканальных, предварительно термически напряженных, трубопроводов тепловых сетей со стартовыми компенсаторами на компенсацию температурных расширений. Методика позволяет определить оптимальное количество стартовых компенсаторов на протяженных участках теплопроводов за счет максимального использования запасов прочности. Получены графические зависимости величины напряжения от длины участка и количества установленных на нем стартовых компенсаторов. Построение по разработанной методике подобных зависимостей позволяет получить полную картину напряженно-деформированного состояния для участков теплопроводов со стартовыми компенсаторами.

### Ключевые слова:

Тепловые сети, бесканальный теплопровод, температурные расширения трубопроводов, предварительно напряженный теплопровод, осевые стартовые компенсаторы.

### Введение

Тепловые сети являются самым дорогостоящим звеном системы теплоснабжения. Теплопроводы в процессе эксплуатации испытывают различные нагрузки и воздействия. Правильно выполненные расчеты теплопроводов на нагрузки и воздействия обеспечивают надежность тепловых сетей. В работе [1] представлена оценка надежности городских тепловых сетей с точки зрения прочностных расчетов. Совокупность нагружающих факторов зависит от способа прокладки теплопровода, который может быть надземным, подземным канальным или бесканальным. Однако, независимо от способа прокладки, для трубопроводов тепловых сетей главным нагружающим фактором является температурное расширение. Как известно, стальные трубы расширяются в продольном направлении после начала движения по ним теплоносителя. Если не предусмотреть на теплотрассе специальных компенсирующих устройств, воспринимающих на себя эти расширения, то неизбежны порывы труб на участках сетей, повреждение опор и подключенного к трубопроводам оборудования.

Бесканальная прокладка по сей день остается перспективным направлением в теплоснабжении и позволяет существенно снизить капиталовложения по сравнению с надземными или полностью канальными сетями, но имеет собственную специфику при проектировании.

Авторы статьи, основываясь на собственном опыте, определили сравнительную полную стоимость сооружения одного километра канальной и бесканальной теплотрассы при различных диаметрах трубопровода. Результаты представлены на рис. 1.

Как видно из рис. 1, экономия капиталовложений при использовании бесканального способа прокладки тепловых сетей составляет от 20 до 50 % по сравнению с канальной прокладкой. Процент экономии зависит от диаметра трубопровода: наибольшая экономия (50 %) наблюдается при использовании диаметра 100 мм, далее, по мере роста диаметра, экономия снижается и при диаметре 1200–1400 мм составляет 20 %. Средний процент экономии по всему диапазону диаметров от 100 до 1400 мм составляет 30 %.

Задача проектирования бесканального теплопровода значительно сложнее, чем надземного или

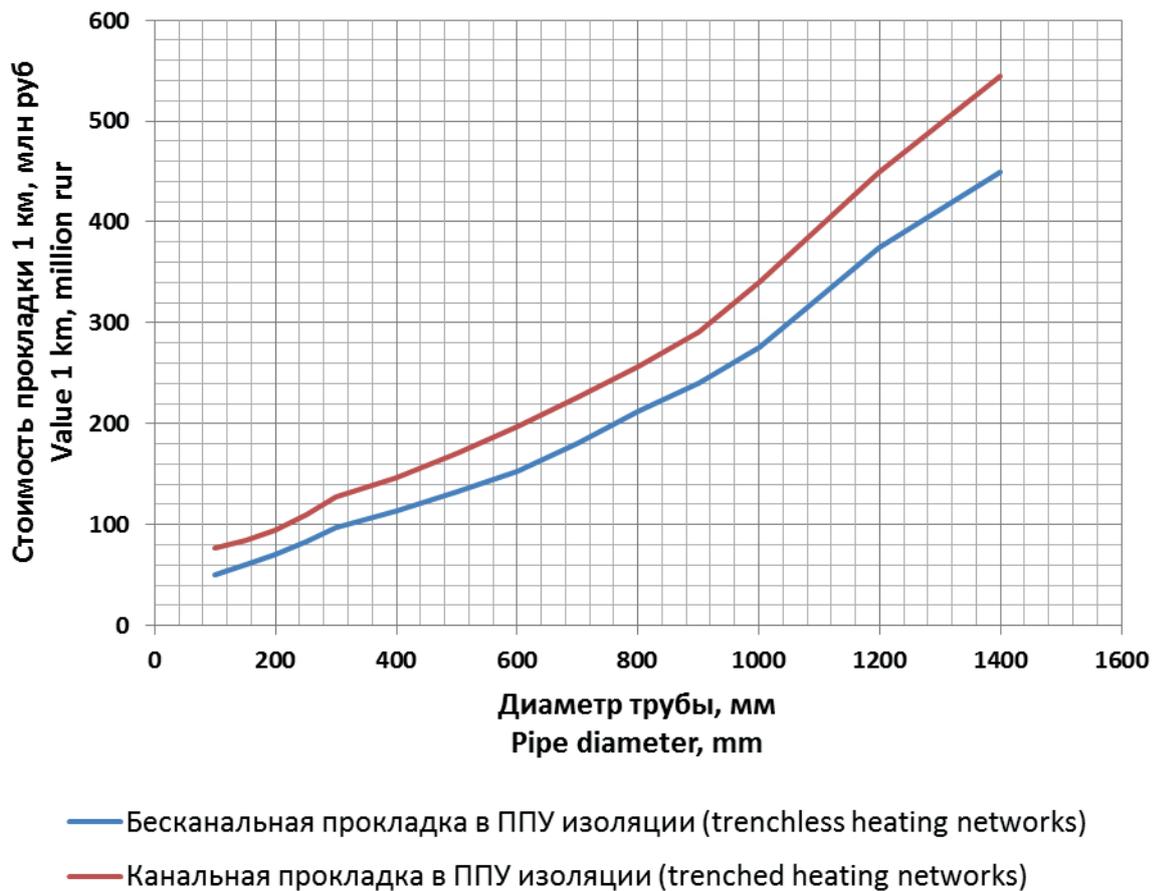


Рис. 1. Стоимость одного километра канальной и бесканальной теплотрассы при разных диаметрах  
 Fig. 1. Cost of 1 km of trenched and trenchless heating networks at different diameters

канального. В работе [2] отражены некоторые теоретические стороны расчета температурных деформаций подземных бесканальных теплопроводов. Алгоритмы для поэтапного анализа напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов представлены в работе [3]. Бесканальная теплотрасса на всем своем протяжении имеет зоны скольжения и зоны неподвижности. В зонах скольжения осуществляется компенсация

температурных расширений теплопровода за счет угловых и линейных деформаций. В зонах неподвижности температурные расширения труб компенсируются осевыми напряжениями растяжения-сжатия.

На рис. 2 изображен пример схемы участка бесканального теплопровода, когда зоны неподвижности отсутствуют, а между зонами скольжения образуются мнимые неподвижные опоры – есте-

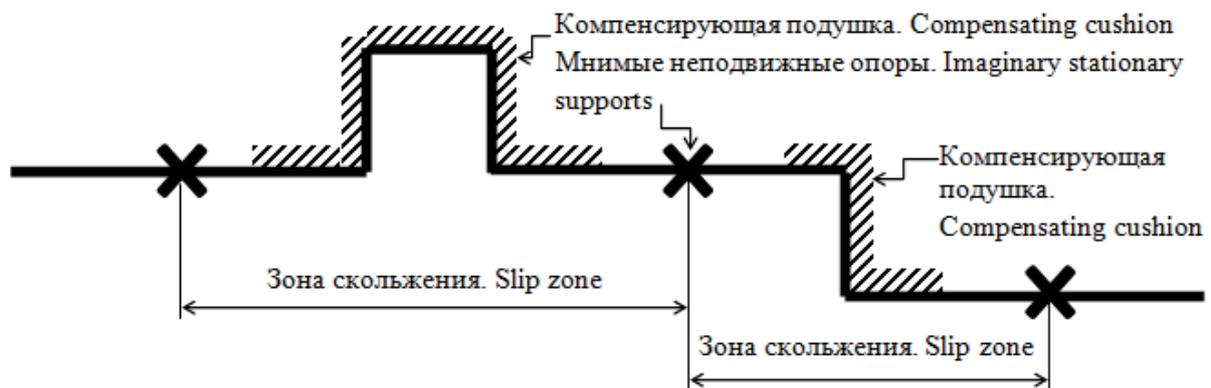


Рис. 2. Участок тепловой сети только с зонами скольжения и мнимыми неподвижными опорами  
 Fig. 2. Section of a heat supply network with slip zones and imaginary stationary supports

ственные неподвижные точки. Теплопровод на рис. 2 распадается на самокомпенсирующиеся участки П- и Z-образной конфигурации. Сопротивление грунта продольным и боковым перемещениям бесканального теплопровода приводит к тому, что осевые усилия возрастают на порядок, по сравнению со свободными от заземления грунта трубами. Таким образом, бесканальные участки теплосетей имеют низкую компенсирующую способность и большие нагрузки на реальные неподвижные опоры. Мнимые неподвижные опоры дают возможность уменьшить количество реальных неподвижных опор, однако определение местоположения этих опор на участках подземной бесканальной прокладки теплопроводов представляет достаточно трудоемкую задачу.

На рис. 3 представлен пример схемы участка бесканального теплопровода с зонами скольжения и неподвижности. Этот пример представляет собой более общий случай, встречающийся на практике, когда зоны скольжения, в местах самокомпенсации теплопровода, чередуются зонами неподвижности. В таких случаях не удается обеспечить компенсацию участка от температурных расширений только путем поворотов теплотрассы, то есть самокомпенсацией. Поэтому, если изменить трассировку сети не представляется возможным, следует прибегнуть к другим методам компенсации температурных расширений, например, произвести предварительное термическое напряжение протяженных прямых участков теплопроводов с помощью стартовых компенсаторов или использовать осевые сильфонные компенсаторы.

Сильфонные компенсаторы воспринимают расширения за счет гофрированной стальной оболочки сильфона. Вопросы расчета сильфонных компенсаторов в тепловых сетях рассмотрены в работе [4]. В работе [5] представлен способ снижения потерь тепловой энергии и затрат при строительстве и эксплуатации тепловых сетей за счет применения осевых сильфонных компенсаторов для компенсации температурных расширений теплопроводов. В работе [6] рассмотрены вопросы назначенной наработки осевых сильфонных компенсаторов.

Известен способ предварительного термического напряжения изолированного теплопровода при помощи его разогрева до значения температуры,

равноудаленного от максимального и минимального эксплуатационного. Такой разогрев происходит в открытых траншеях, после чего они засыпаются грунтом. Таким образом, в теплопроводе возникают эксплуатационные напряжения растяжения и сжатия, которые по модулю не превышают половину расчетного напряжения. Расчетное напряжение приравнивается к напряжению, возникающему в теплопроводе при изменении его эксплуатационной температуры от минимального до максимального значения.

В условиях города нет возможности держать траншеи долгое время открытыми. Поэтому вариант с применением предварительного термического напряжения изолированного теплопровода в открытых траншеях нецелесообразен. В этом случае решение находят в применении осевых сильфонных стартовых компенсаторов. Стартовые компенсаторы основаны на принципе действия сильфонных компенсаторов. Отличие здесь в том, что стартовый компенсатор срабатывает только один раз (после предварительного нагрева теплопровода). При этом траншеи, кроме мест расположения стартовых компенсаторов, закрыты. После срабатывания стартовых компенсаторов их кромки завариваются, и компенсаторы с теплопроводом представляют единую конструкцию. С точки зрения строительной механики такая конструкция называется неразрезной.

Главные трудности при проектировании участка со стартовыми компенсаторами вызывает выбор оптимального количества компенсаторов на расчетном участке, а также расстояния между ними. В работе [7] рассмотрены вопросы проектирования и строительства предварительно напряженных теплопроводов со стартовыми компенсаторами.

При проектировании бесканальных, предварительно термически напряженных участков теплопроводов очень важен корректный выбор расчетных температур. При бесканальной прокладке грунт препятствует выпадению температур в область отрицательных значений и участвует в формировании температурного поля. Например, в работах [8, 9] представлены теоретические исследования процессов теплопереноса в зонах размещения теплопроводов.

Все температуры при расчете должны рассматриваться применительно к стальной части тепло-

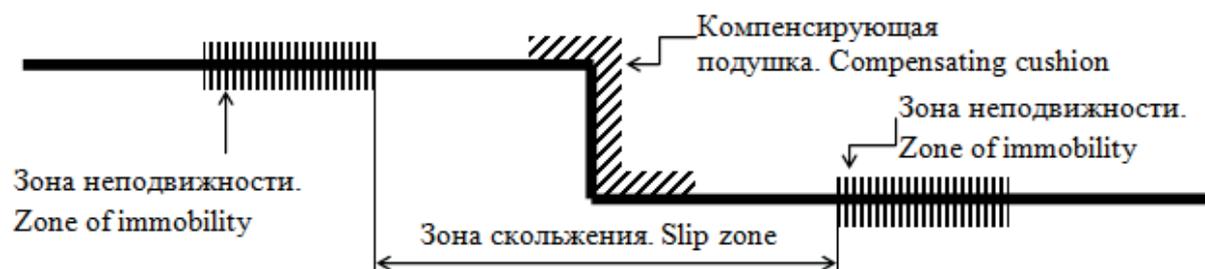


Рис. 3. Участок тепловой сети с зонами скольжения и зонами неподвижности

Fig. 3. Section of a heating network with slip zones and zones of immobility

проводов. При помощи графика отпуска тепловой энергии определяется максимальная эксплуатационная температура. Минимальная эксплуатационная температура подбирается путем прогнозирования. При выборе этой температуры часто возникают сложности. Однако можно руководствоваться следующей рекомендацией: если теплопроводы эксплуатируются как в отопительный период, так и круглогодично, то целесообразно принять значение минимальной эксплуатационной температуры +8 °С. Это объясняется тем, что после завершения отопительного сезона температура труб всегда превышает +8 °С, а когда сезон только начинается, значение соответствует температуре грунта, то есть около +8 °С. С большим запасом можно выбрать минимальную температуру эксплуатации, равную 0 °С. Такое решение, при возможных авариях на теплопроводе, обеспечит на время ремонта положительную температуру труб.

Далее необходимо правильно выбрать температуру монтажа. Эта температура относится к стальной части теплопровода и характеризует начало его термического напряжения. Монтажная температура не соотносится с минимальной эксплуатационной температурой и определяется методом интерполяции с учетом текущего значения температуры окружающего воздуха и температуры грунта на глубине заложения теплопровода.

Наконец следует определиться с температурой предварительного нагрева. Эта температура определяется расчетом и ее значение отображает меру нагрева стальной части теплопроводов, когда закончен процесс термического напряжения и кромки стартовых компенсаторов завариваются.

#### Математическая модель расчета предварительно термически напряженного участка теплопровода со стартовыми компенсаторами

В рамках данной работы подготовлена математическая модель расчета предварительно термически напряженного участка теплопровода со стартовыми компенсаторами.

Величина допускаемых осевых напряжений в стальных трубах определяется исходя из следующей формулы

$$\sigma_{dop} = 1,25\varphi_u \sqrt{1,04[\sigma]^2 - 0,4[\sigma]P \left[ \frac{D_{int}^2}{2(D_{int} + \delta_{st})\delta_{st}\varphi_w} + 1 \right]},$$

где  $[\sigma]$  – номинальное допускаемое напряжение, МПа;  $\varphi_u$  – понижающий коэффициент на прочность сварных швов при наличии изгибающей нагрузки;  $\varphi_w$  – понижающий коэффициент на прочность сварных швов при расчете на избыточное давление;  $P$  – внутреннее избыточное давление, МПа;  $D_{int}$  – внутренний диаметр трубы, мм;  $\delta_{st}$  – номинальная толщина стенки трубы, мм.

Удельная сила трения теплопровода о грунт определяется по формуле

$$q_{tr} = \mu[1 - 0,5 \sin \varphi_{gr}] \gamma_{gr} Z \pi D_0 + g],$$

где  $\mu$  – коэффициент трения трубной оболочки о грунт;  $\varphi_{gr}$  – угол внутреннего трения грунта, град.;  $\gamma_{gr}$  – объемный вес грунта, Н/м<sup>3</sup>;  $Z$  – глубина заложения теплопровода, м;  $D_0$  – наружный диаметр кожуха изоляции, мм;  $g$  – вес теплопровода с изоляцией и теплоносителем, приходящийся на единицу его длины, Н/м.

Таким образом, исходя из выбранных значений минимальной и максимальной температур эксплуатации, требуется вычислить оптимальное значение температуры предварительного нагрева. Напряжения растяжения и сжатия должны быть наиболее рационально распределены по длине теплопровода и не должны превышать по модулю допускаемых напряжений. Диапазон допускаемых напряжений определяется следующим образом

$$\Delta\sigma_{dop} = 2\sigma_{dop},$$

где  $\Delta\sigma_{dop}$  – величина диапазона допускаемых напряжений, МПа;  $\sigma_{dop}$  – допускаемое осевое напряжение, МПа.

При изменении температуры от минимальной эксплуатационной до максимальной напряжение будет определяться следующим образом

$$\Delta\sigma_t = \alpha\Delta TE,$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения стального теплопровода, мм/м°С;  $\Delta T$  – разность между максимальной и минимальной эксплуатационными температурами, °С;  $E$  – модуль упругости материала трубы, МПа.

Напряжение  $\Delta\sigma_t$  составляет часть диапазона допускаемых напряжений  $\Delta\sigma_{dop}$ . Еще часть этого диапазона будет задействована напряжением от сил трения теплопровода о грунт, которое возникнет в процессе термического напряжения и перестроится со временем в напряжение от сил трения покоя. В предельном случае, когда использован весь диапазон допускаемых осевых напряжений, с учетом напряжений от сил трения о грунт, можно построить следующую зависимость

$$\Delta\sigma_{dop} = 2\sigma_{dop} = \Delta\sigma_t + \sigma_{tr,max},$$

где  $\Delta\sigma_{tr,max}$  – максимальное напряжение от сил трения теплопровода о грунт, МПа.

Выражение для определения максимального допустимого расстояния от компенсирующего устройства до реальной неподвижной опоры или естественной зоны заземления можно сформулировать следующим образом

$$l_{max} = \frac{F_{st}\sigma_{tr,max}}{q_{tr}},$$

где  $F_{st}$  – площадь поперечного сечения стенки трубы, м<sup>2</sup>;  $q_{tr}$  – удельная сила трения теплопровода о грунт, Н/м.

Так как стартовый компенсатор примыкает к двум участкам  $l_{max}$ , расстояние между стартовыми компенсаторами  $L_{sk}$  будет определяться по формуле

$$L_{sk} = 2l_{max}$$

где  $l_{max}$  – максимальное допустимое расстояние от компенсирующего устройства до неподвижной опоры или естественной зоны заземления, м.

Максимальные напряжения от сил трения теплопровода о грунт вызывают отрицательные напряжения сжатия. Когда процесс предварительного напряжения закончен и достигнута температура предварительного нагрева, дальнейший нагрев до максимальной температуры эксплуатации вызывает напряжения сжатия в уже заземленном теплопроводе. Эти напряжения складываются с напряжениями от сил трения и ограничены в сумме допускаемыми напряжениями на сжатие. Таким образом, можно сформулировать следующую зависимость

$$\sigma_{dop} \geq \sigma_{tr,max} + \sigma_{\Delta tn}$$

где  $\sigma_{\Delta tn}$  – отрицательные термические напряжения сжатия, МПа.

Для предельного случая имеем следующее выражение

$$\sigma_{dop} = \sigma_{tr,max} + \sigma_{\Delta tn}$$

Для отрицательных термических напряжений сжатия можно построить следующую зависимость

$$\sigma_{\Delta tn} = \alpha(t_{max,e} - t_{pn})E,$$

где  $t_{max,e}$  – максимальная температура эксплуатации, °С;  $t_{pn}$  – температура предварительного нагрева, °С.

Исходя из этой зависимости, температура предварительного нагрева определяется следующим образом

$$t_{pn} = t_{max,e} - \frac{\sigma_{\Delta tn}}{\alpha E}.$$

На рис. 4 представлена схема предварительно термически напряженного участка теплопровода с двумя стартовыми компенсаторами и эпюры напряжений. Ниже оси абсцисс, под знаком минус, представлена эпюра напряжений от сил трения и нагрева до максимальной эксплуатационной температуры. Над осью абсцисс, под знаком плюс, отображена эпюра напряжений при охлаждении теплопровода до минимальной температуры эксплуатации. Участок на представленной схеме ограничен двумя неподвижными опорами, обозначенными на рисунке как N1 и N2. Сильфонные стартовые компенсаторы обозначены как SK1 и SK2. Естественная фиксированная точка, точка естественного заземления, обозначена как N0. Остальные обозначения расшифрованы в представленных выше формулах.

Расчетная величина срабатывания стартового компенсатора определяется из следующего выражения

$$\Delta l_{sk} = 2\Delta l_{max} = 2 \left[ \alpha(t_{pn} - t_m)l_{max} - \frac{q_{tr}l_{max}^2}{2EF_{st}} \right],$$

где  $\Delta l_{max}$  – удлинение участка  $l_{max}$ , м;  $t_m$  – температура монтажа, °С.

Нужно помнить, что сжатие стартового компенсатора не должно превышать максимальной величины его осевого хода. Снижать нагрузки на неподвижные опоры при помощи стартовых компенсаторов необходимо с учетом того, что для любого участка трубопровода существует осевая нагрузка

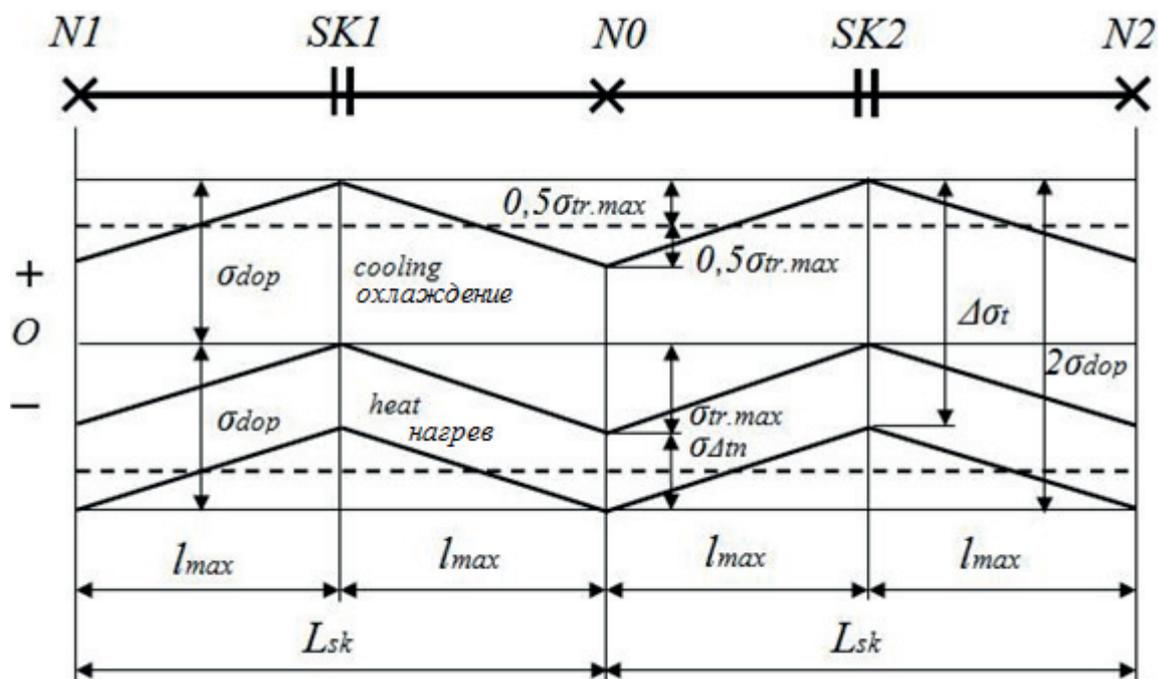


Рис. 4. Схема предварительно термически напряженного участка теплопровода и эпюры напряжений

Fig. 4. Scheme of thermally pre-stressed heat pipe section and stress diagrams

на неподвижную опору, меньше которой получить невозможно. Эта нагрузка не зависит ни от способа прокладки трубопровода, ни от его длины, а определяется только исходя из температурного перепада и площади поперечного сечения стенки трубы. Рассчитывается эта нагрузка по следующей формуле

$$P = \alpha \Delta T E F_{st},$$

где  $P$  – осевая нагрузка, Н;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения, мм/м°C;  $\Delta T$  – температурный перепад, °C;  $E$  – модуль упругости, Па;  $F_{st}$  – площадь поперечного сечения стенки трубы, м<sup>2</sup>.

Протяженные участки теплопроводов должны проверяться на предмет потери устойчивости. Иначе теплопровод может потерять первоначальную форму равновесия. Следует отметить, что устойчивость бесканальных теплопроводов существенно выше, чем надземных или канальных теплопроводов, за счет сил противодействия грунта. Критическую длину можно определить, воспользовавшись уточненной формулой Эйлера для стержня, шарнирно-опертого по концам, в частном случае, когда потеря устойчивости происходит вследствие увеличения его длины

$$P_{kr} = 4\pi^2 \frac{EJ}{l^2} = \alpha \Delta T E F_{st},$$

где  $P_{kr}$  – критическое усилие, Н;  $J$  – момент инерции поперечного сечения стенки трубы, м<sup>4</sup>;  $l$  – критическая длина, м.

Вопросы по расчету устойчивости трубопроводов с осевыми сильфонными компенсаторами рассмотрены в работе [10]. Если расчет показывает, что трубопровод не устойчив, можно стабилизировать теплопровод расстановкой направляющих опор. В работе [11] рассмотрены вопросы применения направляющих опор на трубопроводах с осевыми сильфонными компенсаторами.

Заменим в рассматриваемой задаче концевые неподвижные опоры углами поворота. Построим характерные для данной задачи эпюры напряжений.

При данных условиях задачи следует произвести корректировку расчета максимальной длины рабочей зоны стартовых компенсаторов, примыкающих к углам поворота. На рис. 5 изображена схема участка теплопровода с углами поворота  $P1$  и  $P2$ . Сильфонные стартовые компенсаторы обозначены на схеме как  $SK1$  и  $SK2$ . Если рассматривается участок с промежуточными стартовыми компенсаторами, то их расчет не подлежит корректировке. Эпюра  $\sigma_{\Delta tn}$  выходит из точек  $A, B$ . При этом данные точки имеют одинаковые ординаты, равные допускаемым напряжениям на сжатие. К этим точкам примыкают такие же эпюры, как на схеме рис. 4. Линии, выходящие из точек  $A$  и  $B$ , имеют те же углы, что и у примыкающих эпюр и пересекают начало координат. Точкой  $O$  обозначено начало участка, а точка  $K$  является его конечной точкой. Отрезком  $L_{max}$  обозначено расстояние

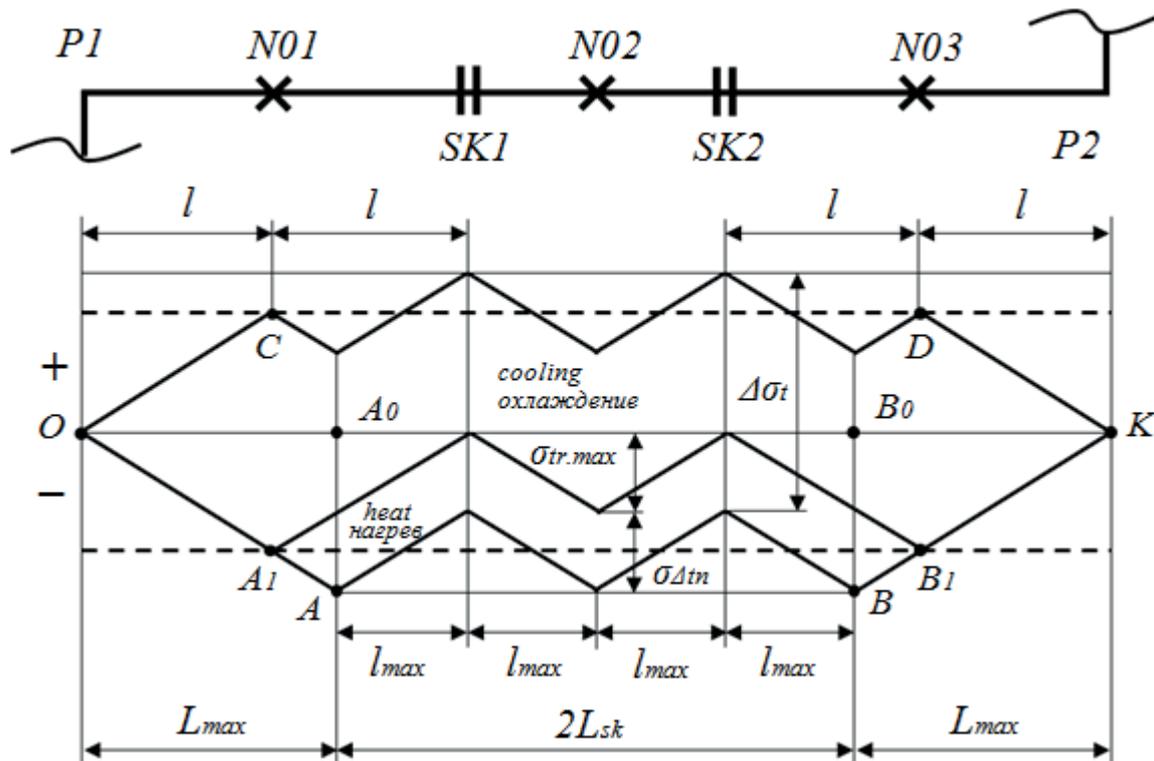


Рис. 5. Характерные эпюры напряжений для участка теплопровода с двумя стартовыми компенсаторами, ограниченного углами поворота

Fig. 5. Characteristic stress diagrams for a heat supply pipe section with two expansion joints, limited by rotation angles

от нулевой точки  $O$  до точки  $AO$ . Это расстояние представляет собой длины участков скольжения при нагревании теплопровода, примыкающих к  $P1$  и  $P2$ . Формула для нахождения  $L_{\max}$  имеет следующий вид

$$L_{\max} = \frac{F_{st} \sigma_{dop}}{q_{tr}}$$

Замена на рассматриваемом участке концевых неподвижных опор углами поворота требует прибавления к исходной длине двух длин  $L_{\max}$ . Исходя из этого, новая длина участка определяется следующим образом

$$L = 2L_{sk} + 2L_{\max}$$

Стартовый компенсатор воспринимает температурные расширения с различных примыкающих участков. Со стороны  $N02$  (естественная фиксированная точка) воспринимаемая длина равна  $l_{\max}$ . Со стороны  $N01$  и  $N03$  воспринимаемая длина одинакова и определяется следующим образом

$$l = \frac{L_{\max} + l_{\max}}{2}$$

Естественные фиксированные точки могут рассматриваться при построении эпюр до завершения срабатывания стартовых компенсаторов и теряют смысл при последующей эксплуатации предварительно напряженного теплопровода.

Новая длина участка с одним стартовым компенсатором определяется следующим образом

$$L_{sk}^n = l + l_{\max}$$

Компенсирующая способность проверяется по следующим формулам

$$\Delta l_{sk1} = \Delta l_{sk2} = \Delta l_{\max} + \Delta l;$$

$$\Delta l_{\max} = \alpha(t_{pn} - t_m)l_{\max} - \frac{q_{tr}l_{\max}^2}{2EF_{st}};$$

$$\Delta l = \alpha(t_{pn} - t_m)l - \frac{q_{tr}l^2}{(2EF_{st})}$$

#### Расчет участка теплопровода со стартовыми компенсаторами и построение эпюр напряжений

Рассмотрим бесканальный участок теплопровода, ограниченный неподвижными опорами. Участок предварительно термически напряжен при помощи двух стартовых компенсаторов. Определим максимальную длину участка, предельное допустимое расстояние между стартовыми компенсаторами, температуру предварительного нагрева и значение хода срабатывания компенсаторов. Построим эпюры напряжений участка.

В качестве примера будем использовать следующие исходные данные: наружный диаметр трубы участка 159 мм; толщина стенки 4,5 мм; теплопровод из стали 17ГС; номинальное допустимое напряжение при максимальной температуре эксплуатации 170 МПа; диаметр изоляционной

оболочки 220 мм; рабочее давление теплоносителя 1,6 МПа; температура подающего трубопровода 130 °С; температура обратного трубопровода 70 °С; минимальная температура эксплуатации 0 °С; летний вариант температуры монтажа 20 °С; зимний вариант температуры монтажа -20 °С; расстояние от верха засыпки до осевой линии трубы 1 м; окружающий грунт – песок; удельная насыпная масса окружающего грунта 1800 кг/м<sup>3</sup>; погонный вес трубопровода с теплоносителем 1000 Н/м; коэффициент трения трубной оболочки о грунт 0,4; паспортная компенсационная способность стартового компенсатора на сжатие 120 мм. На рис. 6 приведены эпюры напряжений для рассматриваемого примера участка теплопровода.

Числа, представленные на рис. 6, обозначают следующие величины: 210 – допустимое осевое напряжение; -115 – отрицательные термические напряжения сжатия в полностью заземленном трубопроводе; 95 – диапазон на обеспечение напряжений от сил трения-скольжения трубопровода о грунт. Размах температурных напряжений составляет 325 МПа. Диапазон допустимых напряжений равен 420 МПа.

Исходя из рис. 6, можно сделать вывод о гармоничном распределении напряжений в заданном диапазоне, не допустив нигде перехода за его границы. Данное распределение было реализовано при температуре предварительного нагрева 84 °С, которая существенно удалена от средней эксплуатационной температуры 65 °С. Таким образом, для достижения оптимального распределения напряжений может быть использовано только одно конкретное значение температуры предварительного нагрева, исключая какой-либо диапазон.

Рассматриваемый участок необходимо проверить на соответствие монтажным температурам. Величина монтажной температуры не оказывает влияния на силовую картину процесса предварительного напряжения и последующую эксплуатацию участка теплопровода. Эта температура определяет величину срабатывания стартовых компенсаторов. Исходя из рассматриваемого примера, величина срабатывания стартовых компенсаторов составляет 58 мм для летнего варианта монтажной температуры и 109 мм для зимнего варианта. В первом случае стартовые компенсаторы загружены на 48 %, во втором случае – на 91 %. Это говорит о том, что удалось произвести предварительное напряжение при помощи двух стартовых компенсаторов с осевым ходом каждого 120 мм.

Для обратного трубопровода были получены следующие результаты: диапазон напряжений при изменении температуры от минимальной до максимальной и обратно 175 МПа; диапазон напряжений от сил трения теплопровода о грунт 245 МПа; максимальное допустимое расстояние от компенсирующего устройства до неподвижной опоры 132 м. Эпюры напряжений для обратного трубопровода строятся аналогичным образом. Температурные деформации обратного трубопровода суще-

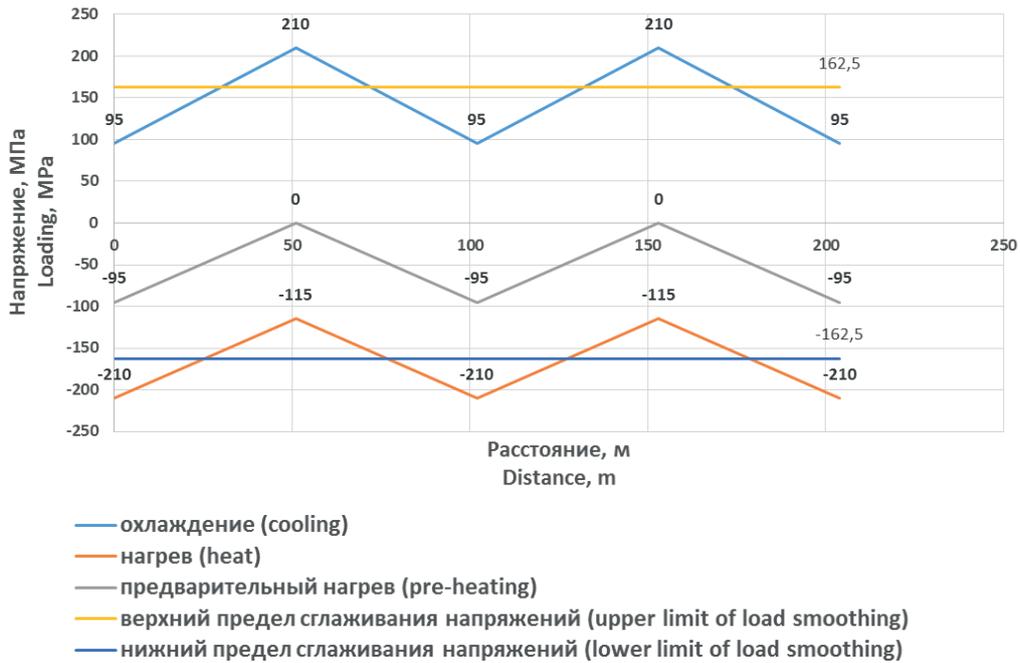


Рис. 6. Эпюры напряжений для рассматриваемого примера участка теплопровода

Fig. 6. Stress diagrams for the given case of a heat supply pipe section

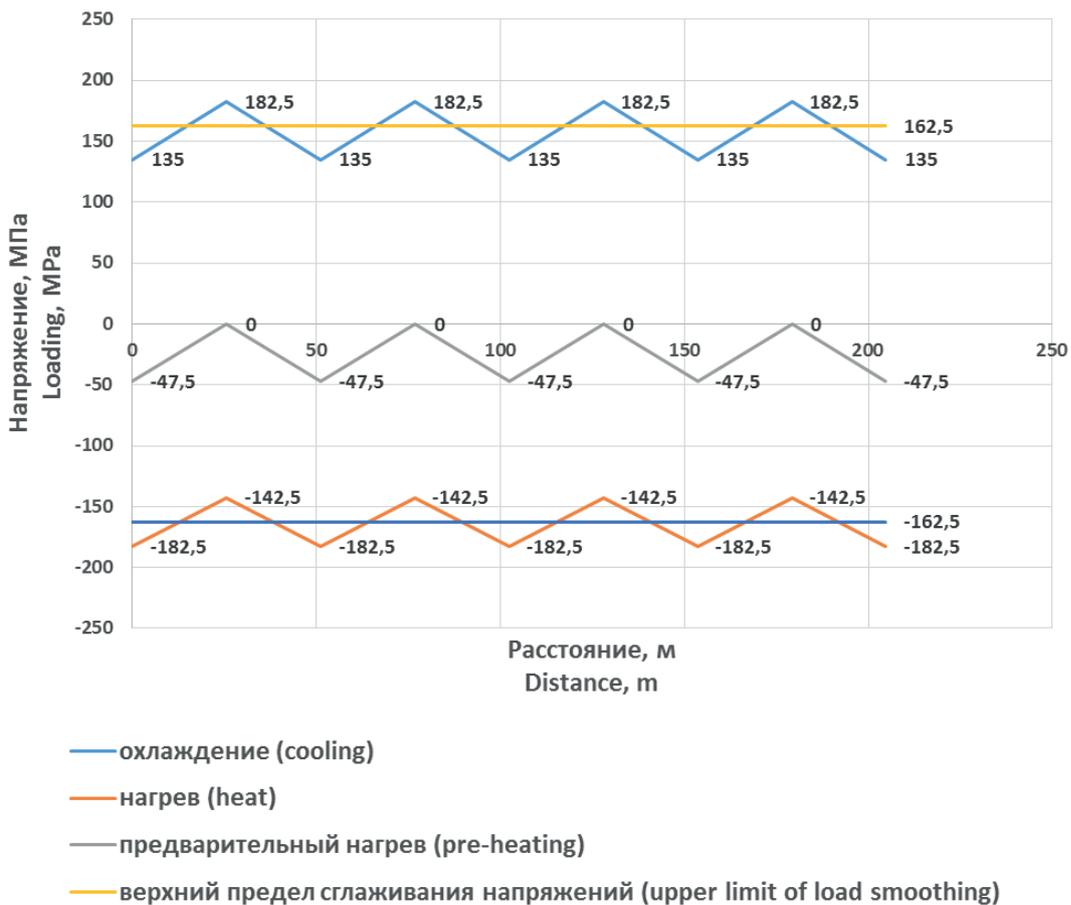


Рис. 7. Эпюры напряжений для рассматриваемого примера участка теплопровода с увеличением числа стартовых компенсаторов до четырех

Fig. 7. Stress diagrams for the given heat supply pipe section with the number of expansion joints increased to four

ственно меньше и не требуют использования компенсаторов с большим осевым ходом.

Заменим для рассматриваемого примера участка теплопровода стартовые компенсаторы с осевым ходом 120 мм на компенсаторы с ходом 60 мм. Тогда для летнего варианта монтажной температуры стартовые компенсаторы будут загружены на 97 %, а для зимнего варианта – на 182 %, что говорит о невозможности предварительного напряжения данного участка в зимнее время из-за недостаточного ресурса компенсирующей способности стартовых компенсаторов. В этом случае необходимо увеличивать число стартовых компенсаторов на участке или подбирать компенсаторы с другим осевым ходом. Таким образом, при отсутствии надежных сведений о календарном времени строительства трубопровода и проведении его предварительного термического напряжения необходимо предусматривать в проекте зимнюю температуру монтажа и проверять по этой температуре компенсирующую способность стартовых компенсаторов.

Увеличим число стартовых компенсаторов с осевым ходом 60 мм в рассматриваемом примере до четырех. Построим эпюры напряжений.

Из рис. 7 видно, что размах температурных напряжений не изменился и составил 325 МПа. Возросли по модулю напряжения, возникающие при нагреве от температуры предварительного нагрева до максимальной эксплуатационной температуры, и составили 135 МПа, вместо прежних 115 МПа. Данное увеличение было необходимо для сохранения равновесия краевых эпюр осевых напряжений для максимальной и минимальной эксплуатационных температур относительно оси абсцисс в условиях вдвое уменьшившихся напряжений от сил трения. Температура предварительного нагрева снизилась с 84 до 76 °С. Было получено равенство по модулю максимальных напряжений растяжения-сжатия, составивших 182,5 МПа. Данный пример показывает оптимизацию напряжений при расчете предварительно термически напряженного теплопровода.

В процессе эксплуатации трубопроводов, под воздействием различных факторов, происходит уменьшение сил трения покоя. В результате этого происходит спад напряжений в стальных трубах. На графиках рис. 6, 7 обозначены линии верхнего и нижнего пределов сглаживания напряжений. Эти линии показывают, как со временем трансформируются эпюры напряжений. Данный процесс увеличивает запас прочности трубопровода и позволяет увеличить допустимый размах напряжений следующим образом

$$\Delta\sigma_{dop} = 2\sigma_{dop} + \sigma_{tr,max}$$

В процессе сглаживания напряжений второе слагаемое представленного выше уравнения должно исчезнуть. Важнейшим условием использования данного приема являются очень качественно сделанные сварные стыковые трубные швы.

Согласно исходным данным в рассматриваемом примере, длины участков, примыкающих к  $P1$  и  $P2$  (рис. 5), равны 113 м. Новая длина всего участка от  $P1$  до  $P2$  составит 431 м. Воспринимаемые компенсатором длины со стороны  $N01$  или  $N03$  составят 82 м. Новая длина участка, обслуживаемая одним стартовым компенсатором, будет равна 133 м. При монтажной температуре +20 °С величина срабатывания компенсаторов составит 63 мм, а при варианте монтажной температуры –20 °С будет равна 130 мм. Таким образом, участок теплопровода с углами поворота позволяет отказаться от краевых неподвижных опор и существенно увеличить длину компенсируемого прямого участка. Вместо углов поворота могут быть использованы радиальные компенсаторы из труб. Но здесь необходимо понимать, что расчет компенсации температурных расширений радиальных компенсаторов представляет собой отдельную задачу, требующую внимательного подхода к решению. Для радиальных компенсаторов самыми ответственными элементами являются отводы, в которых происходит овализация поперечного сечения стенки трубы, в результате которой отвод становится более гибким, чем прямая труба, но и более уязвимым к повреждениям из-за концентраторов напряжений, обусловленных резким изменением геометрии отвода. В настоящее время вопросам расчета отводов трубопроводов посвящено немало работ. Например, в работах [12, 13] рассматриваются аналитические решения для кривых труб. В работах [14, 15] рассматриваются решения для кривых труб с применением метода конечных элементов. Вопросы расчета радиальных компенсаторов на температурные воздействия рассмотрены в работах [16, 17].

Со временем на участке теплопровода с углами поворотов будут происходить релаксации напряжений и эпюры, представленные на схеме рис. 5, сгладятся и в пределе будут представлять собой линии  $OA0BOK$  и  $OCDK$ . Эпюры после процесса релаксации идентичны тем, которые получились бы сразу для предварительно напряженного участка теплопровода, находящегося в канале и не испытывающего сил трения грунта. Температура для предварительного нагрева для канального участка составит среднюю температуру между максимальной и минимальной эксплуатационной. Таким образом, для бесканального участка теплопровода приходится преодолевать существенный барьер, обусловленный силами трения грунта, который со временем исчезнет.

Построим для рассматриваемого примера участка теплопровода зависимость максимальной длины от глубины засыпки. Под максимальной длиной понимается расстояние от компенсирующего устройства до неподвижной опоры или точки естественного заземления. В представленной выше математической модели это расстояние было обозначено как  $l_{max}$ . Из представленного графика на рис. 8 видно, как с увеличением глубины за-

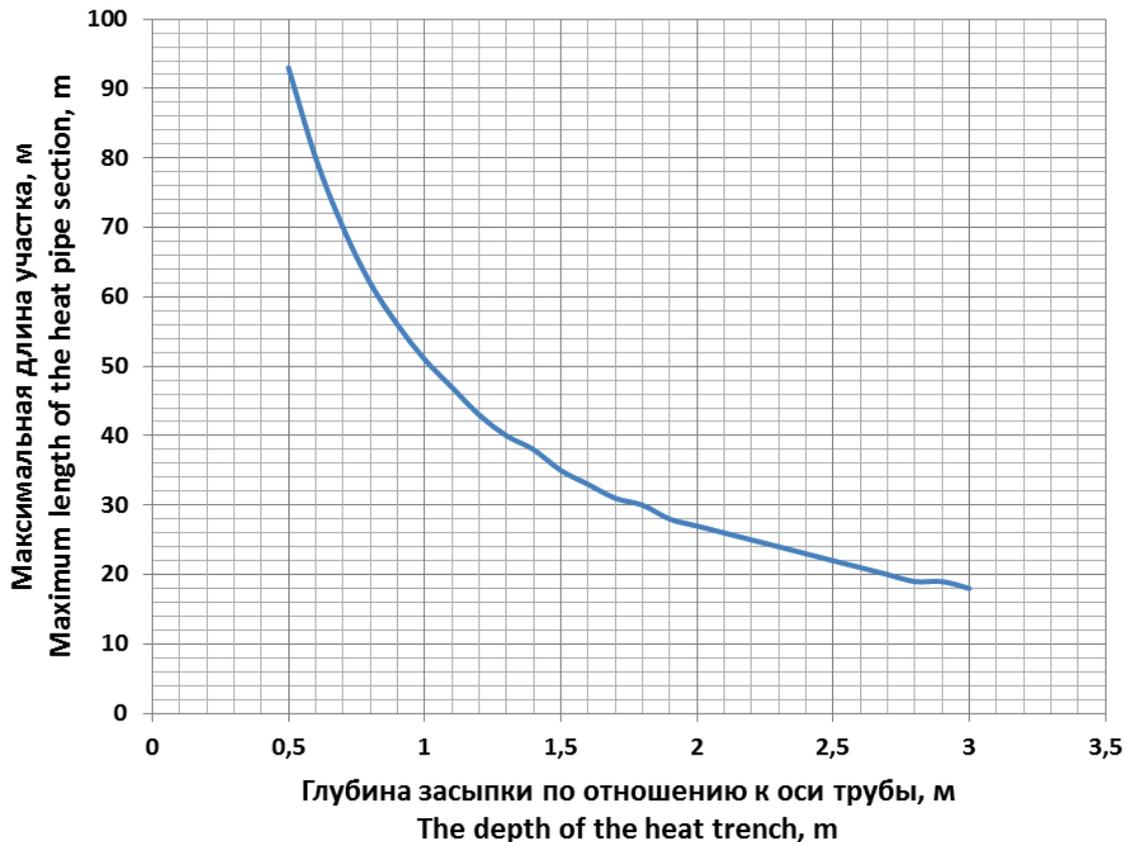


Рис. 8. Зависимость максимальной длины участка теплопровода от глубины засыпки

Fig. 8. Dependence of maximum length of the heat supply pipe section on filling depth

сыпки стремительно снижается максимальная длина. Здесь следует руководствоваться не только экономической выгодой, но и технической целесообразностью. Например, в работе [18] обоснована необходимость выглубления каналов тепловых сетей. В работе [19] выявлена связь между заглублением трубопроводов и интенсивностью их коррозии. В работе [20], при помощи математического моделирования, представлены методы расчета тепловых полей в грунтах.

#### Заключение

Предложенная методика расчета подземных бесканальных, предварительно термически напряженных стальных трубопроводов тепловых сетей позволяет проектировать протяженные прямые участки с использованием стартовых компенсаторов, что дает возможность экономить значительные капиталовложения при строительстве

тепловых сетей. Методика позволяет корректно использовать для этой цели запасы прочности теплопровода. Построенные расчетные схемы и эпюры напряжений дают наглядное представление о процессе предварительного термического напряжения и последующей эксплуатации участка теплопровода со стартовыми компенсаторами.

По изложенным выше материалам можно сделать следующие выводы: 1) применение стартовых компенсаторов позволяет проектировать длинные прямолинейные бесканальные неразрезные участки теплопроводов; 2) сжатие стартового компенсатора не должно превышать максимальной длины его осевого хода; 3) протяженные прямые участки бесканального теплопровода необходимо проверять на предмет потери устойчивости; 4) использование углов поворота и естественных неподвижных точек при бесканальной прокладке позволяет отказываться от применения неподвижных опор.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белиловец В.И., Липовка А.Ю., Липовка Ю.Л. Оценка надежности городских тепловых сетей с точки зрения прочностных расчетов // Современные проблемы архитектуры, градостроительства, дизайна: Материалы II Международной научно-практической конференции. – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 376–378.
2. Липовка Ю.Л., Белиловец В.И. Некоторые теоретические стороны расчета температурных деформаций подземных бесканальных теплопроводов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2016. – Т. 9. – № 4. – С. 546–562.
3. Алешин В.В., Селезнев В.Е. Численный анализ прочности подземных трубопроводов. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 320 с.
4. Магалиф В.Я. Проектирование трубопроводов тепловых сетей бесканальной прокладки с применением сильфонных компенсаторов // Новости теплоснабжения. – 2009. – № 4. – С. 44–26.
5. Логунов В.В., Поляков В.Л., Слепченко В.С. Опыт применения осевых сильфонных компенсаторов в тепловых сетях // Новости теплоснабжения. – 2007. – № 7. – С. 47–52.
6. Кузин Е.В., Логунов В.В., Поляков В.Л. О назначенной нагрузке сильфонных компенсаторов // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 3. – С. 48–50.
7. Максимов Ю.И. Некоторые аспекты проектирования и строительства бесканальных термически напряженных предизолированных трубопроводов с применением стартовых компенсаторов // Новости теплоснабжения. – 2008. – № 1. – С. 24–34.
8. Three Dimensional Numerical Model of Heat Losses from District Heating Network Pre Insulated Pipes Buried in the Ground / J. Danielewicz, B. Dniechowska, M.A. Sayegh, N. Fidorow, H. Jouhara // Energy. – 2016. – V. 108. – P. 172–184.
9. Половников В.Ю., Глазырин Е.С. Численный анализ влияния инженерных сооружений на тепловые потери бесканальных теплопроводов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 2 (46). – С. 5–13.
10. Кузин Е.В., Логунов В.В., Поляков В.Л. Устойчивость трубопроводов с осевыми сильфонными компенсаторами // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 7. – С. 42–50.
11. Кузин Е.В., Логунов В.В., Поляков В.Л. Применение направляющих опор на трубопроводах с осевыми сильфонными компенсаторами // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 12. – С. 34–38.
12. Radchenko S.A. Analytical and numerical solution for a elastic pipe bend at in-plane bending with consideration for the end effect // International Journal of Solids and Structures. – 2007. – № 44. – P. 1488–1510.
13. Kolesnikov A.M. Large bending deformations of pressurized curved tubes // Arch. Mech. – 2011. – № 63. – P. 507–516.
14. Fonseca E.M.M., De Melo F.J.M. Q., Madureira M.L.R. Multi-nodal Ring Finite Element for Analysis of Pipe Deflection // International Journal of Manufacturing Science and Engineering. – 2011. – V. 2. – № 2. – P. 109–114.
15. Giordano A., Guarracino F. Assessment of the Limit Load of Cylindrical Tubes under Bending: Theoretical Background, Experimental Data, and Finite Elements Analyses // ABAQUS Users' Conference. – Napoli, 2002. – P. 143–151.
16. Липовка Ю.Л., Белиловец В.И., Липовка А.Ю. The influence of slenderness ratio and stress concentration in taps on load calculations to thermal expansion in П-shaped compensators of thermal network // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2015. – Т. 8. – № 1. – С. 11–32.
17. Белиловец В.И. The Influence Factors of Flexibility and Stress Concentration in the Taps to the Calculation of Cooling Strain of Radial Compensators in Heat Supply Network // Проспект Свободный–2015: Материалы научной конференции, посвященной 70-летию Великой Победы. – Красноярск: СФУ, 2015. – С. 11–15.
18. Чичерин С.В. Выглубление каналов тепловых сетей – ключ к их эффективной эксплуатации // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2017. – Т. 328. – № 9. – С. 49–56.
19. Duffy P.F. Underground District Heating Mains: Causes of Failure // Building Services Engineering Research and Technology. – 1991. – V. 12. – № 3. – P. 111–113.
20. Ming Zhu, Michalowski R.L. Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS // ABAQUS Users' Conference. – Michigan, 2005. – P. 1–7.

Поступила 30.01.2018 г.

## Информация об авторах

**Белиловец В.И.**, аспирант кафедры инженерных систем зданий и сооружений Сибирского федерального университета.

**Липовка Ю.Л.**, доктор технических наук, профессор кафедры инженерных систем зданий и сооружений Сибирского федерального университета.

UDC 624.042.12

## DESIGNING UNDERGROUND TRENCHLESS THERMALLY PRE-STRESSED HEAT SUPPLY PIPELINES WITH EXPANSION JOINTS

Vitaly I. Belilovets<sup>1</sup>,  
vitaliy.belilovec@mail.ru

Yury L. Lipovka<sup>1</sup>,  
lipovka.j.l@gmail.com

<sup>1</sup> Siberian Federal University,  
79, Svobodny avenue, Krasnoyarsk, 660041, Russia.

**Relevance.** The important research field in heat supply is design of underground trenchless heat supply networks which can significantly reduce capital expenditures compared to above-ground or fully trenched networks. Using the optimal number of expansion joints allows designing extended rectilinear sections of underground trenchless heat supply pipelines. Currently, design and construction of thermally pre-stressed trenchless pipelines of heating networks raises acute questions in specialists. There is not much up-to-date information in this topic. Trenchless laying requires more strict approach to solutions for compensation of temperature expansions. Thus, the refined methods for analysis of thermal expansion compensation in pipes and utilization of trenchless laying of heating network sections can save dozens of millions of rubles.

**The aim** of the research is to develop a technique for analyzing compensation of temperature expansions in underground trenchless thermally pre-stressed steel pipelines of water heating networks with expansion joints.

**Methods:** mathematical modeling of the stress-strain state of a section of a trenchless heat supply pipeline with expansion joints; numerical solution of the test problem for the section of the heat supply pipeline with known parameters using the developed technique.

**Results.** This paper introduces a technique for analysis of underground trenchless thermally pre-stressed pipelines of heating networks with expansion joints compensating temperature expansions. This technique allows using the optimum number of expansion joints on extended sections of heat supply pipelines due to the maximum use of the strength reserve. The research gave characteristic curves of the stress value depending on length of the section and the number of the expansion joints installed on it. The construction of such curves using the proposed method allows obtaining a complete picture of the stress-strain state for sections of heat supply pipelines with expansion joints.

### Key words:

Heat networks, trenchless heat supply pipeline, temperature expansion of pipelines, pre-stressed heat supply pipeline, axial expansion joints.

### REFERENCES

- Belilovets V.I., Lipovka A.Yu., Lipovka Yu.L. Otsenka nadezhnosti gorodskikh teplovykh setey s tochki zreniya prochnosti raschetov [Reliability Analysis of Urban Heating Networks in Terms of Strength Calculations]. *Sovremennye problemy arkhitektury, gradostroitelstva, dizayna. Materialy II mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Modern Aspects of Architecture, Urban Planning, Design. Proc. of the II International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2015. pp. 376–378.
- Lipovka Yu.L., Belilovets V.I. Some Theoretical Aspects of Temperature Deformation Analysis in Underground Trenchless Heat Supply Pipelines. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2016, vol. 9, no. 4, pp. 546–562. In Rus.
- Aleshin V.V., Seleznev V.E. *Chislenny analiz prochnosti podzemnykh truboprovodov* [Numerical Analysis of Strength of Underground Pipelines]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2003. 320 p.
- Magalif V.Ya. Designing of Pipelines of Trenchlessly Laid Heating Networks Using Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2009, no. 4, pp. 44–26. In Rus.
- Logunov V.V., Polyakov V.L., Slepchenok V.S. Application of Axial Expansion Bellowses in Heating Networks. *Heat Supply News*, 2007, no. 7, pp. 47–52. In Rus.
- Kuzin E.V., Logunov V.V., Polyakov V.L. About Preset Operating Time of Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2011, no. 3, pp. 48–50. In Rus.
- Maksimov Yu.I. Some Aspects of Design and Construction of Trenchless Thermally Stressed Pre-Insulated Pipelines with the use of Expansion Joints. *Heat Supply News*, 2008, no. 1, pp. 24–34. In Rus.
- Danielewicz J., Dniechowska B., Sayegh M.A., Fidorow N., Jouhara H. Three Dimensional Numerical Model of Heat Losses from District Heating Network Pre Insulated Pipes Buried in the Ground. *Energy*, 2016, vol. 108, pp. 172–184.
- Polovnikov V.Yu., Glazyrin E.S. Numerical analysis of the impact of engineering constructions on heat loss of channel-free heat pipelines. *Magazine of Civil Engineering*, 2014, no. 2 (46), pp. 5–13. In Rus.
- Kuzin E.V., Logunov V.V., Polyakov V.L. Stability of Pipelines with Axial Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2011, no. 7, pp. 42–50. In Rus.
- Kuzin E.V., Logunov V.V., Polyakov V.L. Application of guide supports in pipelines with axial Bellows-sealed compensators. *Heat Supply News*, 2011, no. 12, pp. 34–38. In Rus.
- Radchenko S.A. Analytical and numerical solution for a elastic pipe bend at in-plane bending with consideration for the end effect. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, no. 44, pp. 1488–1510.
- Kolesnikov A.M. Large bending deformations of pressurized curved tubes. *Arch. Mech.*, 2011, no. 63, pp. 507–516.
- Fonseca E.M.M., De Melo F.J.M. Q., Madureira M.L.R. Multi-nodal Ring Finite Element for Analysis of Pipe Deflection. *International Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 109–114.
- Giordano A., Guarracino F. Assessment of the Limit Load of Cylindrical Tubes under Bending: Theoretical Background, Experimental Data, and Finite Elements Analyses. *ABAQUS Users' Conference*. Napoli, 2002. pp. 143–151.
- Lipovka Yu.L., Belilovets V.I., Lipovka A.Yu. The Influence of Slenderness Ratio and Stress Concentration in Taps on Load Cal-

- culations to Thermal Expansion in II-shaped Compensators of Thermal Network. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technology*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 11–32.
17. Belilovets V.I. The Influence Factors of Flexibility and Stress Concentration in the Taps to the Calculation of Cooling Strain of Radial Compensators in Heat Supply Network. *Prospekt Svobodny-2015. Materialy nauchnoy konferentsii, posvyashchenoy 70-letiyu Velikoy Pobedy* [Prospekt Svobodny-2015: Proceedings of the scientific conference dedicated to the 70<sup>th</sup> anniversary of the Great Victory]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2015. pp. 11–15.
  18. Chicherin S.V. Deepening of trenches of heating networks – the key to their effective operation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 49–56. In Rus.
  19. Duffy P.F. Underground District Heating Mains: Causes of Failure. *Building Services Engineering Research and Technology*, 1991, vol. 12, no. 3, pp. 111–113.
  20. Ming Zhu, Michalowski R.L. Simulation of Heat Transfer in Freezing Soils Using ABAQUS. *ABAQUS Users' Conference*. Michigan, 2005. pp. 1–7.

*Received: 31 January 2018.*

#### **Information about the authors**

**Vitaly I. Belilovets**, postgraduate student, Siberian Federal University.

**Yury L. Lipovka**, Dr. Sc., professor, Siberian Federal University.