



## Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода

Р.Н.БАХТИЗИН, Р.М.ЗАРИПОВ, Г.Е.КОРОБКОВ, Р.Б.МАСАЛИМОВ

Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа, Республика Башкортостан, Россия

В статье обоснован учет воздействия внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода. По утверждению некоторых ученых, ошибочно используется понятие эквивалентного продольного осевого усилия (ЭПОУ)  $S_x$ , которое зависит от рабочего давления, температурных напряжений и совместных деформаций трубопровода с грунтом. Однако авторы статьи используют понятие ЭПОУ  $S_x$  при построении математической модели напряженно-деформированного состояния (НДС) сложного участка магистрального трубопровода, а также раскрывают его при анализе результатов расчета прочности и устойчивости трубопровода. Анализ НДС рассчитываемого участка нефтепровода осуществлен для двух постановок задачи при различных значениях параметров эксплуатации. В первой постановке учитывается воздействие внутреннего давления, вызывающего изгиб трубопровода, а во второй пренебрегается этим воздействием. Показано, что за счет действия эквивалентного продольного осевого усилия  $S_x$  при  $p_0 = 9,0$  МПа,  $\Delta t = 29$  °C расчетное экстремальное значение прогиба увеличивается на 54, а расчетные экстремальные значения изгиблых напряжений от пролетного изгибающего момента возрастают на 74 %, расчетные значения экстремальных изгиблых напряжений от опорного изгибающего момента увеличиваются в два раза по сравнению с соответствующими характеристиками НДС трубопровода. В случае пре-небрежения воздействием внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода, погрешность расчета экстремального значения прогиба составляет 35 %, а экстремального значения изгиблых напряжений от пролетных изгибающих моментов равна 44 % и экстремального значения изгиблых напряжений от опорных изгибающих моментов составляет 95 %.

**Ключевые слова:** нефтепровод, трубопровод, грунт, прогиб, усилие, моменты, напряжение, деформация, давление

**Как цитировать эту статью:** Оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода / Р.Н.Бахтизин, Р.М.Зарипов, Г.Е.Коробков, Р.Б.Масалимов // Записки Горного института. 2020. Т. 242. С. 160-168. DOI: 10.31897/PMI.2020.2.160

**Введение.** Данная статья посвящена обоснованию учета воздействия внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода, и опровержению утверждений некоторых авторов работ [2, 4, 5] об ошибочном введении понятия ЭПОУ  $S_x$ , определяемого в зависимости от внутреннего рабочего давления, температурных напряжений и совместных деформаций трубопровода с различными типами грунтов в работах И.П.Петрова и В.В.Спиридовонова [11], А.Б.Айнбиндера и А.Г.Камерштейна [1], а также в нормативном документе, регламентирующем сооружение и эксплуатацию магистральных трубопроводов [16]. Это обоснование будет дано при построении математической модели НДС сложного магистрального участка трубопровода, а также будет раскрыто при анализе результатов расчета прочности трубопровода. Далее представим необходимую информацию о постановке задачи, методе ее решения [12].

**Постановка задачи.** Профиль рассчитываемого участка трубопровода условно делится на части, в которых геометрические и жесткостные характеристики трубы постоянны, условия нагружения и грунтовые условия идентичны или изменяются плавно, без скачков. За математическую модель трубопровода принимается одномерная стержневая система, состоящая из криволинейных и прямолинейных стержней трубчатого сечения и их узлов сопряжения [8, 12]. На рис.1

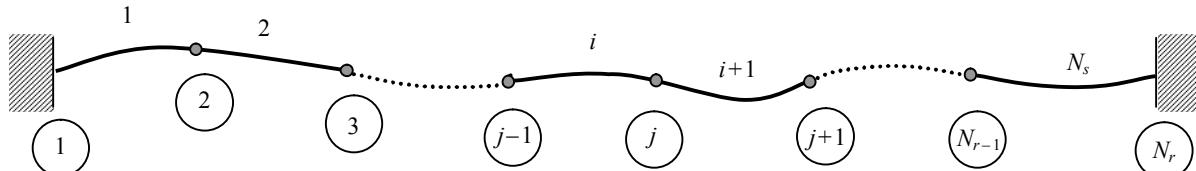


Рис.1. Расчетная схема продольной оси стержневой системы



схематично изображена продольная ось стержневой системы, условно разбитая на стержневые и узловые элементы, которые пронумерованы следующим образом:  $i$  – номер стержневого элемента;  $N_s$  – их общее количество ( $1 \leq i \leq N_s$ );  $j$  – номер узлового элемента;  $N_r$  – общее количество узлов ( $1 \leq j \leq N_r$ ). Если в трассе трубопровода нет разветвлений, то  $N_r = N_s + 1$ .

На рис.2 представлен элемент стержня длиной  $dx$ , который после нагружения внешними силами переходит из нижнего положения в верхнее. Здесь же указаны направления осей криволинейной системы координат. Она, деформируясь вместе с продольной осью элемента стержня, сопровождает его при его смещении.

Деформации сжатия-растяжения продольной оси стержня  $\varepsilon_x$ , угол поворота ее нормали  $\omega_x$ , деформации изгиба  $\chi$  связаны с ее продольным перемещением  $u$  и прогибом  $w$  с помощью кинематических нелинейных дифференциальных соотношений [8, 12]:

$$\varepsilon_x = \frac{du}{dx} - \frac{w}{\rho_0} + \frac{1}{2}\omega_x^2; \quad \omega_x = -\frac{dw}{dx} + \frac{u}{\rho_0}; \quad \chi = \frac{d\omega_x}{dx}, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – радиус кривизны продольной оси стержня до его деформации (радиус кривизны отвода);  $x$  – продольная осевая координата стержня.

Вывод кинематических (геометрических) нелинейных дифференциальных соотношений (1), выполненный авторами статьи, представлен в работе [12]. В них вводится сопутствующая система координат, жестко связанная с осевой линией стержня, которая, деформируясь с этой осью, перемещается вместе с ней в пространстве. Далее по теории дифференциальной геометрии и теории нелинейных деформаций стержней устанавливаются зависимости между трехгранниками Серре – Френе продольных осей стержня до и после его деформации, что позволяет получить основные кинематические (геометрические) нелинейные дифференциальные соотношения, связывающие деформации растяжения-сжатия, изгиба и кручения продольной оси стержня через координаты вектора перемещения  $u$ . Если предположить, что стержень находится в плоско-деформированном состоянии, т.е. деформация стержня происходит без кручения, то нелинейные дифференциальные соотношения упрощаются и могут быть представлены в виде формулы (1).

В книге [1] при расчете НДС трубопровода с кривыми вставками последние заменяются прямыми трубами, соединенными под углом, т.е. положение продольной оси кривой вставки в пространстве задается ломаной линией. Геометрические соотношения (1) в отличие от аналогичных соотношений работы [1] для прямолинейных стержней получены с учетом начальной кривизны продольной оси стержня. Следовательно, в расчетах НДС трубопроводов с кривыми вставками (отводами) по разработанной нами математической модели нет необходимости заменять кривых вставок ломаными, которая осуществляется в методиках, использующих теорию расчета НДС трубопроводов работы [1]. Расчеты, осуществленные в работе [12], показали, что такая замена может привести к неверным результатам, поскольку модель ломанных вместо кривой вставки не может адекватно описать НДС трубопровода с кривыми вставками и потерю устойчивости при его сжатии в продольном осевом направлении.

Уравнения равновесия стержня, моделирующего НДС отдельной части условного разбиения подземного участка трубопровода, имеют следующий вид [8, 12]:

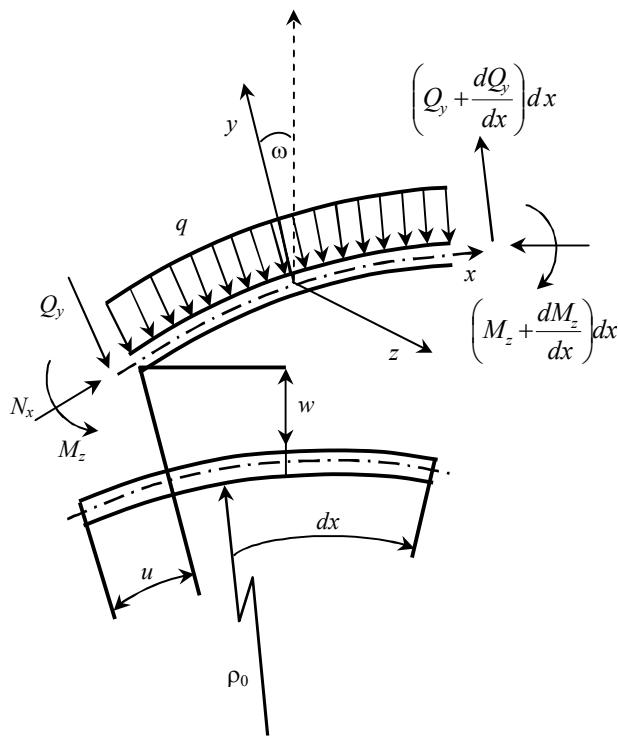


Рис.2. Расчетная схема элемента стержня



$$\begin{aligned} \frac{d(N_x + \omega_x Q_y)}{dx} - \frac{Q_y}{\rho_0} &= r_x + q_x - q_y \omega_x; \\ \frac{dQ_y}{dx} + \left( \frac{1}{\rho_0} + \chi \right) (N_x - p_0 F_{cb}) &= r_y + q_y; \\ \frac{dM_z}{dx} - Q_y &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $N_x$ ,  $Q_y$  – соответственно продольное осевое усилие и перерезывающая сила, направленные по касательной и нормали к деформированной продольной оси стержня;  $M_z$  – осевой изгибающий момент, под действием которого продольная ось стержня закручивается вокруг бинормали в плоскости чертежа;  $r_x$ ,  $r_y$  – соответственно касательная и нормальная составляющие реакции грунта на продольное перемещение и прогиб трубы;  $q_x$ ,  $q_y$  – соответственно продольная и нормальная составляющие внешней распределенной нагрузки, состоящей из веса трубопровода с жидкостью или с газом, а также давления (веса) грунта засыпки на трубу;  $p_0$  – внутреннее рабочее давление;  $F_{cb}$  – площадь поперечного сечения стенки трубы «в свету».

Физическая взаимосвязь между силовыми факторами и деформациями растяжения-сжатия и изгиба трубы принимается в виде следующих соотношений [8, 12]:

$$N_x = (E \varepsilon_x + \mu \sigma_{kz} - \alpha \Delta t E) F_0; M_z = E J \chi, \quad (3)$$

где  $E$ ,  $\mu$  – соответственно переменный параметр упругости (модуль Юнга) и переменный коэффициент поперечной деформации стали (коэффициент Пуассона), определяемые по формулам нормативного документа [16] с учетом деформации стали трубы в упругопластической области;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения стали трубы;  $\sigma_{kz}$  – кольцевые напряжения от внутреннего рабочего давления;  $\Delta t$  – температурный перепад;  $F_0$  – площадь поперечного сечения стенки трубы;  $J$  – момент инерции поперечного сечения трубы.

При составлении дифференциальных уравнений равновесия в векторной форме учитывается отличие полных производных от частных производных по времени, что приводит к появлению в них продольной составляющей от внутреннего давления, действующего перпендикулярно на стенку трубы [12, 15]. Такой способ составления дифференциального уравнения в векторной форме впервые использовал В.А.Светлицкий [15]. При описании кинематических соотношений (1) правильным будет проектирование составленных уравнений равновесия и граничных условий в векторной форме на деформированную продольную ось стержня. Только в этом случае компоненты вектора усилий будут иметь четкий физический смысл: они будут представлять перерезывающую силу и продольные усилия. Тогда в решении задачи методом конечных элементов отпадает необходимость нахождения координат узлов сопряжения, так как в сопутствующей системе координат, жестко связанной с продольной осью стержневой системы, координаты этой линии не меняются при деформации последней.

Энергетические методы исследования, применяемые в задачах устойчивости трубопроводов, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях, не могут адекватно описать их НДС, поскольку решение задачи предопределяет принятая форма выпучивания [1]. Авторами работ [8, 12] разработаны методы расчета НДС и устойчивости подземных трубопроводов со сложным очертанием продольной оси трубы методом конечных элементов с учетом совместной деформации с грунтом и параметров эксплуатации. Поскольку задача о НДС отдельного стержневого элемента решена в геометрически нелинейной постановке и учитывает физическое нелинейное поведение грунта, то отпадает необходимость дополнительной проверки на продольную устойчивость трубопровода. В настоящей статье уравнения равновесия (2) составлены в криволинейной системе координат, жестко связанной с ортами продольной оси деформируемого трубопровода. В работах [8, 12] дано полное описание численного метода решения поставленной задачи, в котором три нелинейных дифференциальных соотношения (1) и три нелинейных дифференциальных уравнения (2) представлены в виде нормальной системы из шести обыкновенных



нелинейных дифференциальных уравнений первого порядка. В каждом узле сопряжения составляется система из трех алгебраических уравнений равновесия с учетом действия сосредоточенных сил и моментов, приложенных в этих узлах, а также ограничений продольного перемещения, угла поворота нормали и прогиба. Эта система уравнений дополняется граничными условиями, поставленными в начале и конце рассчитываемого участка. Нормальная система нелинейных дифференциальных уравнений при нахождении элементов матрицы жесткости, компонентов вектора обобщенных усилий и НДС отдельного стержневого элемента решена методом ортогональной прогонки академика С.К.Годунова [3]. При нахождении перемещений узловых элементов используется метод перемещений, разработанный А.В.Александровым для расчета оболочных конструкций, в котором, в отличие от стандартных методов конечных разностей и конечных элементов, разбиением рассчитываемой конструкции на узловые и стержневые элементы разрешающая система алгебраических уравнений составляется в узлах сопряжения этих элементов с учетом особенностей конструкции трубопровода. Это позволяет снизить на несколько порядков основную разрешающую систему алгебраических уравнений. В.И. Мяченковым с применением этого метода разработаны теория и комплекс программ расчета прочности и устойчивости конструкций, которые моделируются композицией тонкостенных упругих оболочек различной формы и колец жесткости (шпангоутов) [9]. Авторами настоящей статьи они были адаптированы к расчету НДС вертикальных цилиндрических резервуаров с корродированными стенками, подкрепленными шпангоутами при выполнении ремонтных работ [8].

Необходимо отметить следующее. Если при составлении уравнений ограничиться рассмотрением частных, а не полных производных по времени, то уравнения равновесия не будут содержать продольную составляющую от внутреннего давления. К сожалению, многие составители и пользователи коммерческих комплексов программ не обращают на это внимания и используют общие дифференциальные уравнения, которые получены без учета отличия полных производных от частных производных по времени, что приводит в расчетах на прочность и устойчивость трубопроводов к пренебрежению воздействием внутреннего давления, вызывающим дополнительный изгиб трубопровода.

Необходимость учета в уравнениях равновесия продольной составляющей от действия внутреннего давления на стенку трубы при ее изгибе доказана в работах В.А.Светлицкого [15], М.А.Ильгамова [6, 7], Tang [19], В.И.Феодосьева [17]. Они рассмотрели различные случаи закрепления торцов трубы, обосновали возможность потери ее устойчивости. Например, М.А.Ильгамов [6, 7] при составлении уравнения равновесия обратил внимание на факт, который заключается в следующем. При искривлении трубы площадь, на которую действует внутреннее давление  $p_0$  с выпуклой стороны поверхности трубы больше, чем с вогнутой. Таким образом, при изгибе трубы образуется избыточная поверхность. Равнодействующая от давления на этой избыточной поверхности будет равна  $p_0 F_{cw} w''$ , под действием этой равнодействующей труба испытывает дополнительный изгиб. Если нет изгиба трубы ( $w'' = 0$ ), то не появится избыточная площадь, поэтому внутреннее давление в трубе не будет вызывать ее дополнительный изгиб.

Вполне обоснованным является факт введения понятия ЭПОУ  $S_x$ , определяемого в зависимости от внутреннего рабочего давления и температурных напряжений, в работах И.П.Петрова и В.В.Спирионова [11], А.Б.Айнбindera и А.Г.Камерштейна [1], а также в нормативном документе, регламентирующем сооружение и эксплуатацию магистральных трубопроводов [16]. Не совсем корректно эта сила названа эквивалентным продольным осевым усилием, но направление ее действия и величина в дифференциальных уравнениях описывается правильно. В работах [1, 8, 12] представлено уравнение, описывающее НДС трубопровода в однопролетном балочном переходе без компенсации продольных перемещений, которое совпадает с уравнением продольно-поперечного изгиба балки под действием вертикальной нагрузки и продольной сжимающей силы, приложенной на ее концах [18]. В работах [8, 12, 18] выполнены подробные исследования решения этого уравнения, а также уравнения продольно-поперечного изгиба растягиваемого стержня, моделирующего НДС трубопровода с компенсатором.

По мнению некоторых исследователей [2, 4, 5], уравнение продольно-поперечного изгиба трубопровода, величина продольной силы в работах [1, 8, 11, 12], а также формулы для проверки продольной устойчивости магистральных трубопроводов, содержащиеся в нормативном документе



[16], составлены с грубыми ошибками. В случае принятия этих выводов комплексы компьютерных программ по расчету прочности и устойчивости трубопроводов, разработанные сотрудниками коллективов ВНИИСТА, Гипропропгаза, ВНИИГАЗа и ЮжНИИГПРОГАЗа за последние 50 лет, а также результаты исследований и других ученых, в которых учитывается воздействие внутреннего давления на изгиб трубопровода в соответствии с требованиями положений нормативного документа [16], следует считать выполненными по неверным уравнениям и ошибочным формулам. Авторы работ [2, 4, 5], некорректно учитывая продольную силу, возникающую от действия внутреннего давления, получили дифференциальное уравнение изгиба трубы, растягиваемой продольной силой. Они считают невозможной потерю устойчивости трубопровода при повышении внутреннего давления, при этом труба растягивается подобно натянутой струне. Эти же авторы утверждают, что «величина ЭПОУ  $S_x$  «проникла» в более важные формулы, описывающие продольно-поперечный изгиб трубопроводов. На основе этой формулы определяются технологические режимы работы трубопроводов. Ошибочная исходная формула приводит к ошибочным результатам, и, как следствие, к непредвиденным случаям (инцидентам и авариям) при ремонте трубопроводов».

Отсутствие в работах [2, 4, 5] анализа решения дифференциального уравнения, полученного авторами этих работ, привело к неверным результатам и некорректным выводам. Они не принимали во внимание известный факт, который следует из решения этого уравнения: увеличение внутреннего давления приводит к уменьшению расчетных характеристик НДС трубопровода. Поэтому получен вывод, противоречащий здравому смыслу: для обеспечения прочности трубопровода необходимо повысить внутреннее давление в трубе. Этот пример заблуждения в постановке задачи, который привел к грубым ошибкам в результатах расчета и выводах, не является единичным случаем у исследователей, занимающихся вопросами прочности и устойчивости трубопроводов. Некоторые из исследователей в расчете устойчивости трубы в однопролетном балочном переходе без компенсации продольных перемещений при нахождении продольного усилия применяют формулу, согласно которой повышение внутреннего давления в трубе приводит к уменьшению расчетного значения продольного усилия, а в расчете НДС трубопровода используют не решение дифференциального уравнения продольно-поперечного изгиба стержня при его сжатии, с помощью которого можно найти значение критической силы сжатия трубы, а решение уравнения изгиба трубы, которое не содержит продольное усилие при ее сжатии в продольном направлении и не может описать явление потери устойчивости трубопровода. Поэтому при нахождении значения критической силы они вводят поправочный коэффициент, который задается в зависимости от некорректно найденного расчетного значения продольного усилия. Эти же исследователи в расчете НДС однопролетного надземного балочного перехода с компенсаторами применяют не решение дифференциального уравнения продольно-поперечного изгиба стержня при его растяжении продольной силой, а решение уравнения изгиба стержня, не зависящее от упора компенсаторов и внутреннего давления в трубопроводе, под действием которого компенсаторы растягивают трубу в продольном направлении при ее изгибе.

**Составление исходных данных расчета.** В работах [10, 13, 14] дано подробное описание составления исходных данных расчета по профилю трассы и параметрам эксплуатации трубопровода. В рассматриваемом нами примере рассчитываемый подземный участок нефтепровода в карстовой зоне имеет длину 300 м. Его средняя часть длиной 48 м за счет развития карста оказалась оголенной, т.е. отсутствует грунт основания и грунт засыпки. Прилегающие к этой средней части слева и справа части длиной по 24 м каждая находятся в ослабленном грунте. В подобных условиях эксплуатации находятся однопролетные бескомпенсаторные надземные переходы без специальных опор, работающие совместно с примыкающими подземными участками трубопровода [1, 8, 12]. Выбранный участок нефтепровода при компьютерном моделировании его НДС условно делится на 50 равных элементарных частей, каждая из которых имеет длину 6 м. В соответствии с продольным профилем трассы для каждой из этих частей выбираются исходные данные расчета: типы грунтов с указанием их несущей способности; абсолютные отметки; глубина заложения и высота засыпки грунта; радиусы и углы поворота гнутых отводов; длины участков с постоянным уклоном; характеристика труб с указанием наружного диаметра  $D_n$  и толщины стенки  $\delta$ ; категория участка трубопровода. Согласно исполнительской документации трубопровод на рассчитываемом участке составлен из труб  $D_n \times \delta = 1020 \times 20,0$  мм.



**Анализ НДС участка нефтепровода и оценка влияния внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода.** Вес трубы с перекачиваемым продуктом для нефтепровода не зависит от внутреннего давления, что позволяет в полной мере выявить влияние ЭПОУ  $S_x$  на изгиб трубопровода. Расчет и анализ НДС рассчитываемого участка нефтепровода выполнен для двух постановок задачи с различными значениями параметров эксплуатации. В первой постановке, обоснование которой дается в данной статье, учитывается воздействие внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода, а во второй постановке пренебрегается этим воздействием [4, 5]. Расчеты были осуществлены для следующих значений параметров эксплуатации нефтепровода: 1)  $p_0 = 9,0 \text{ МПа}$ ;  $\Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2)  $p_0 = 4,5 \text{ МПа}$ ;  $\Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 3)  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $\Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 4)  $p_0 = 9,0 \text{ МПа}$ ;  $\Delta t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 5)  $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ ;  $\Delta t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , где  $\Delta t$  – температурный перепад, который равен разности температур эксплуатации и замыкания трубопровода при строительстве. В таблице приведены экстремальные значения основных характеристик НДС трубопровода для двух постановок задачи: прогиба  $w$ ; продольного перемещения  $u$ ; напряжений от продольных усилий  $\sigma_N$ ; изгибных напряжений  $\sigma_M$ ; суммарных продольных напряжений  $|\sigma_{\text{пп}}^{\text{H}}|$  и их предельно допустимых значений  $[\sigma_{\text{пп}}^{\text{H}}]$  от нормативных воздействий и нагрузок [16], полученных из решения задачи о НДС нефтепровода при  $l_0 = 48 \text{ м}$ , где через  $l_0$  обозначена длина части в середине рассчитываемого участка и где за счет активного развития карста отсутствует грунт-засыпка, а грунт-основание исчерпал несущую способность и не может препятствовать продольному перемещению трубы. В частях, которые слева и справа прилегают к вышеописанной средней части, каждая длиной 24 м, грунт-основание также ослаблен за счет развития карста, но он еще не исчерпал свою несущую способность, а в грунте-засыпке еще не нарушен свод естественного равновесия. В первой постановке задачи учитывается воздействие внутреннего давления в трубопроводе, которое вызывает дополнительный изгиб трубы, т.е. по модели, которая подробно была описана нами в постановке задачи.

Результаты расчета максимальных значений характеристик НДС нефтепровода

Варианты расчетов		$w, \text{м}$	$\sigma_N^*, \text{МПа}$	$S_x, \text{kH}$	$\sigma_M^{**}, \text{МПа}$	$ \sigma_{\text{пп}}^{\text{H}} , \text{МПа}$	$[\sigma_{\text{пп}}^{\text{H}}], \text{МПа}$
1-я постановка задачи	$p_0 = 9,0 \text{ МПа}; \Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,54	0/12	7654/6828	219/-167	234	216
	$p_0 = 4,5 \text{ МПа}; \Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,49	-36/-27	6229/5580	190/-137	230	316
	$p_0 = 0,1 \text{ МПа}; \Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,44	-71/-64	4831/4308	168/-120	242	385
	$p_0 = 9,0 \text{ МПа}; \Delta t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,4	72/78	2845/2420	149/-106	230	385
	$p_0 = 0,1 \text{ МПа}; \Delta t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,35	5,6/1,1	7/-203	126/-84	129	385
2-я постановка задачи	$p_0 = 9,0 \text{ МПа}; \Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,35	0/3,8	58/-237	122/-86	127	385
	$p_0 = 4,5 \text{ МПа}; \Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,39	-30/-36	2427/2038	142/-101	181	316
	$p_0 = 0,1 \text{ МПа}; \Delta t = 29 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,44	-71/-74	4747/4230	167/-120	241	386
	$p_0 = 9,0 \text{ МПа}; \Delta t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,29	71/75	-4701/-4979	97/-64	170	386
	$p_0 = 0,1 \text{ МПа}; \Delta t = 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$	-0,35	0,7/5,5	-71/-372	121/-86	129	386

Примечания: \* в числителе дроби приведены напряжения на концах рассчитываемого участка, а в знаменателе – в его средней части;

\*\* в числителе дроби приведены напряжения от пролетного изгибающего момента, а в знаменателе – от опорного.



Большой интерес представляет анализ решений теории продольно-поперечного изгиба трубопровода, которые получены из системы дифференциальных уравнений (2) при отсутствии совместных деформаций трубопровода с грунтом и когда ЭПОУ  $S_x$  принимает постоянное значение [1, 8, 12]. Эти уравнения являются равносильными хорошо изученными дифференциальными уравнениями продольно-поперечного изгиба стержня классической теории изгиба стержней [18]. Анализ показал, что при увеличении внутреннего давления возрастает величина ЭПОУ  $S_x$ , а также экстремальные значения характеристик НДС трубопровода.

В случае, когда  $p_0 = 9,0$  МПа;  $\Delta t = 29$  °C, значение напряжений от продольного усилия  $\sigma_N = 0$  МПа, следовательно и величина продольного усилия  $N_x(x) = 0$  кН. Если принять точку зрения некоторых ученых [2, 4, 5], которые считают, что величина ЭПОУ, определяемая по рекомендациям нормативного документа [16] является ошибочной, т.е. если не учитывать в расчетах воздействие внутреннего давления, создающего дополнительный изгиб трубопровода, то в системе дифференциальных уравнений (2) необходимо пренебречь членом  $\chi p_0 F_{cb}$ . Поэтому при указанных значениях внутреннего давления и температуры характеристики НДС трубопровода должны принимать меньшие значения по сравнению с соответствующими характеристиками НДС трубопровода при понижении внутреннего давления в трубе, так как с уменьшением внутреннего давления возрастает значение продольного усилия  $N_x$ , которое растягивает трубу в продольном направлении.

Если вернуться к корректной постановке задачи, то на самом деле этого не происходит, поскольку с ростом значения внутреннего давления увеличивается и значение ЭПОУ  $S_x$ , за счет действия которого трубопровод испытывает дополнительный изгиб. Например, за счет действия ЭПОУ  $S_x$  при  $p_0 = 9,0$  МПа,  $\Delta t = 29$  °C экстремальное значение прогиба увеличивается на 54 %, экстремальные значения изгибных напряжений от пролетного изгибающего момента возрастают на 74 %, а экстремальное значение изгибных напряжений от опорного изгибающего момента увеличивается в два раза. При уменьшении внутреннего давления в трубопроводе с  $p_0 = 9,0$  до  $p_0 = 4,5$  МПа эти же характеристики НДС трубопровода увеличиваются только на 40, 67 и 39 % соответственно. Только за счет действия температурных напряжений, т.е. при  $p_0 = 0,1$  МПа,  $\Delta t = 29$  °C указанные характеристики НДС трубопровода возрастают на 26, 34 и 31 % соответственно. Если отсутствует температурный перепад, т.е. при  $p_0 = 9,0$  МПа,  $\Delta t = 0$  °C экстремальное значение прогиба увеличивается на 14, экстремальные значения изгибных напряжений от пролетного изгибающего момента возрастают на 32, а экстремальное значение изгибных напряжений от опорного изгибающего момента увеличивается на 37 %.

В связи с этим большой интерес представляет расчет НДС участка трубопровода без учета воздействия внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода, т.е. без учета члена  $\chi p_0 F_{cb}$  в системе дифференциальных уравнений (2). Именно такой подход используется в некоторых вышеупомянутых работах, авторы которых считают грубой ошибкой учет члена  $\left(\frac{1}{\rho_0} + \chi\right)(-p_0 F_{cb})$  в этой системе. Поэтому, по их мнению, в системе дифференциальных уравнений (2) слагаемое  $\left(\frac{1}{\rho_0} + \chi\right)(N_x - p_0 F_{cb})$  необходимо заменить на  $\left(\frac{1}{\rho_0} + \chi\right)(N_x)$ .

Некоторые результаты расчета НДС трубопровода с этой поправкой представлены в таблице, анализ данных которой показывает следующее. На концах рассчитываемого участка, где трубопровод защемлен грунтом и находится в горизонтальном положении, при  $p_0 = 9,0$  МПа;  $\Delta t = 29$  °C имеем  $N_s = 0$  без учета члена  $\chi p_0 F_{cb}$  в системе дифференциальных уравнений (2). Поэтому при данном значении ЭПОУ  $S_x$  экстремальные характеристики НДС трубопровода принимают минимальные значения по сравнению с соответствующими характеристиками НДС трубопровода при значениях параметров эксплуатации трубопровода, представленных в таблице. Например, если снизить внутреннее давление  $p_0$  в два раза, т.е. с 9,0 до 4,5 МПа, то экстремальное значение прогиба возрастает с 0,35 до 0,39 м (увеличивается более чем на 12 %). Это объясняется тем, что при уменьшении внутреннего давления увеличивается значение продольного усилия  $N_x$ . В этом случае система дифференциальных уравнений (2) будет эквивалентна дифференциальному уравнению продольно-поперечного изгиба стержня при его растяжении продольной силой  $N_x = 4747$  кН.



Практический интерес представляет вариант расчета НДС трубопровода, когда  $\Delta t = 0$  °C, т.е. отсутствуют температурные напряжения и при этом пренебрегается слагаемым  $\chi p_0 F_{\text{св}}$  в системе дифференциальных уравнений (2). Анализ данных таблицы показывает, что при увеличении внутреннего давления  $p_0$  с 0,1 до 9,0 МПа экстремальное значение прогиба уменьшается на 17, экстремальное значение изгибных напряжений от пролетных изгибающих моментов – на 20, а экстремальное значение изгибных напряжений от опорных изгибающих моментов – на 26 %. Этот результат объясняется тем, что с увеличением внутреннего давления за счет некорректного определения ЭПОУ  $S_x$ , по рекомендациям работ [2, 4, 5], величина этой силы начинает принимать отрицательное значение, а система дифференциальных уравнений (2) переходит к уравнению продольно-поперечного изгиба трубы при его растяжении в продольном направлении [12, 18]. При этом погрешность расчета экстремального значения прогиба составляет 35, экстремального значения изгибных напряжений от пролетных изгибающих моментов и экстремального значения изгибных напряжений от опорных изгибающих моментов составляет 44 и 95 % соответственно. Погрешность расчета этих характеристик при  $p_0 = 9,0$  МПа;  $\Delta t = 0$  °C, т.е. при отсутствии температурных напряжений, для экстремального значения прогиба равна 28, а экстремального значения изгибных напряжений от пролетных изгибающих моментов и экстремального значения изгибных напряжений от опорных изгибающих моментов составляет 35 и 40 % соответственно. Что и следовало ожидать при отсутствии воздействия внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубы, т.е. при  $p_0 = 0,1$  МПа;  $\Delta t = 29$  °C или при  $p_0 = 0,1$  МПа;  $\Delta t = 0$  °C результаты расчета характеристик НДС трубопровода по первой и второй постановке задач идентичны.

## Выводы

1. Для обоснования учета в математической модели НДС воздействия внутреннего давления в трубопроводе, вызывающего дополнительный изгиб трубы, и опровержения утверждений некоторых ученых [2, 4, 5] об ошибочном введении понятия ЭПОУ  $S_x$ , определяемого в зависимости от внутреннего рабочего давления, температурных напряжений и совместных деформаций трубопровода с различными типами грунтов в работах [1, 11], а также в нормативном документе [16] представлен анализ основных дифференциальных уравнений, описывающих НДС стержневого элемента. При нахождении перемещений узловых элементов используется метод перемещений, в котором, в отличие от стандартных методов конечных разностей и конечных элементов, разрешающая система алгебраических уравнений составляется в узлах сопряжения этих элементов с учетом особенностей конструкции трубопровода, что позволяет снизить на несколько порядков основную разрешающую систему алгебраических уравнений.

2. Для обоснования учета воздействия внутреннего давления в трубопроводе, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода, расчет и анализ НДС рассчитываемого участка нефтепровода выполнен для различных значений параметров эксплуатации: с учетом воздействия внутреннего давления, вызывающего его дополнительный изгиб, и без его учета. Показано, что за счет действия ЭПОУ  $S_x$  при  $p_0 = 9,0$  МПа,  $\Delta t = 29$  °C экстремальное значение прогиба увеличивается на 54, экстремальные значения изгибных напряжений от пролетного изгибающего момента возрастают на 74 %, а экстремальное значение изгибных напряжений от опорного изгибающего момента увеличивается в два раза. В случае пренебрежения воздействием внутреннего давления, вызывающего дополнительный изгиб трубопровода (вторая постановка задачи), погрешность расчета экстремального значения прогиба составляет 35, экстремального значения изгибных напряжений от пролетных изгибающих моментов равна 44 и экстремального значения изгибных напряжений от опорных изгибающих моментов составляет 95 %.

3. По мнению некоторых исследователей [2, 4, 5] уравнение продольно-поперечного изгиба, величина продольной силы в работах [1, 6-8, 11, 12, 17, 19], а также формулы для проверки продольной устойчивости магистральных трубопроводов, содержащиеся в нормативном документе [16], составлены с грубыми ошибками. В случае принятия этих выводов комплексы компьютерных программ по расчету прочности и устойчивости трубопроводов, а также результаты исследований,



в которых учитывается воздействие внутреннего давления на изгиб трубопровода в соответствии с требованиями положений нормативного документа [16], необходимо считать выполненными по неверным уравнениям и ошибочным формулам. Они считают невозможной потерю устойчивости трубопровода при повышении внутреннего давления, при этом труба растягивается подобно натянутой струне. Отсутствие в этих работах анализа решения дифференциального уравнения привело к неверным результатам и некорректным выводам. В результате сделан противоречащий здравому смыслу вывод: для обеспечения прочности трубопровода необходимо повысить внутреннее давление в трубе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Айнбinder A.B. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б.Айнбinder, А.Г.Камерштейн. М.: Недра, 1982. 340 с.
2. Глазков А.С. Продольно-поперечный изгиб трубопровода на участках грунтовых изменений / А.С.Глазков, В.П.Клинов, К.М.Гумеров // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2012. № 1 (87). С. 63-70. DOI: 10.17122/ntj-oil-2012-1-63-70
3. Годунов С.К. Метод ортогональной прогонки для решения систем разностных уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1962. Т. 2. № 6. С. 972-982.
4. Гумеров К.М. К оценке продольной устойчивости магистрального трубопровода / К.М.Гумеров, С.А.Сильверстов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017. № 1 (107). С. 60-68. DOI: 10.17122/ntj-oil-2017-1-60-68
5. Гумеров К.М. Продольная устойчивость трубопроводов / К.М.Гумеров, Л.Н.Ракова, В.М.Буларова: Сборник трудов Международной молодежной научной конференции «Наукоемкие технологии в решении проблем нефтегазового комплекса». Уфа, 19-24 декабря 2016 г. С. 193-197.
6. Ильгамов М.А. Колебания упругих оболочек, содержащих жидкость и газ. М.: Наука, 1969. 181 с.
7. Ильгамов М.А. Статические задачи гидроупругости. Казань: Институт механики и машиностроения РАН, 1994. 208 с.
8. Коробков Г.Е. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов и резервуаров в осложненных условиях / Г.Е.Коробков, Р.М.Зарипов, И.А.Шаммазов. СПб: Недра, 2009. 408 с.
9. Мяченков В.И. Методы и алгоритмы расчета пространственных конструкций на ЭВМ ЕС / В.И.Мяченков, В.П.Мальцев. М.: Машиностроение, 1984. 280 с.
10. Обеспечение прочности подземного участка нефтепровода в карстовой зоне при установке различных типов компенсаторов / Р.Н.Бахтизин, Р.М.Зарипов, Г.Е.Коробков, Р.Б.Масалимов // Нефтяное хозяйство. 2018. № 3. С. 82-84. DOI: 10.24887/0028-2448-2018-3-82-84
11. Петров И.П. Надземная прокладка трубопроводов / И.П. Петров, В.В. Спиридовон. М.: Недра, 1973. 472 с.
12. Расчет и обеспечение прочности трубопроводов в сложных инженерно-геологических условиях. Т. 1. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния и устойчивости трубопроводов / А.М.Шаммазов, Р.М.Зарипов, В.А.Чичелов, Г.Е.Коробков. М.: Интер, 2005. 705 с.
13. Расчетное обоснование возвращения трубопровода в проектное положение и обеспечение его прочности изменением его конструкции / Р.Н.Бахтизин, Р.М.Зарипов, Г.Е.Коробков, Р.Б.Масалимов // Известия Уфимского научного центра Российской академии наук. 2017. № 1. С. 9-16.
14. Расчетное обоснование установки компенсаторов-упоров в карстовой зоне на потенциально опасном участке газопровода / Р.Н.Бахтизин, Р.М.Зарипов, Г.Е.Коробков, Р.Б.Масалимов, И.Ф.Усманов // Газовая промышленность. 2018. № 3 (765). С. 72-77.
15. Светлицкий В.А. Механика трубопроводов и шлангов. М.: Машиностроение, 1982. 280 с.
16. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\*. М.: Госстрой, ФАУ «ФЦС», 2013. 92 с.
17. Феодосьев В.И. Избранные задачи и вопросы по сопротивлению материалов. М.: Наука, 1973. 400 с.
18. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 2. М.: Наука, 1978. 616 с.
19. Tang D.M. Buckling and post-buckling behaviour of a pipe subjected to internal pressure / D.M.Tang, M.A.Ilgamov, E.H.Dowell // Journal of Applied Mechanics. 1995. Vol. 62. Iss. 3. P. 595-600. DOI: 10.1115/1.2895987

**Авторы:** Р.Н.Бахтизин, д-р физ.-мат. наук, профессор, ramil\_bahtilzin@mail.ru (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа, Республика Башкортостан, Россия), Р.М.Зарипов, д-р техн. наук, профессор, rail.zaripov@gmail.com (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа, Республика Башкортостан, Россия), Г.Е.Коробков, д-р техн. наук, профессор, korobkov45@mail.ru (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа, Республика Башкортостан, Россия), Р.Б.Масалимов, канд. техн. наук, доцент, masalimovrb@mail.ru (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г.Уфа, Республика Башкортостан, Россия).

Статья поступила в редакцию 17.07.2019.

Статья принята к публикации 10.12.2019.