

## Анализ деформирования внешне ограниченных металлических труб

© А.В. Егоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*К трубам с внешним ограничением отнесены конструкции типа труба — грунт, в которых модуль упругости грунта меньше, чем у металлической трубы. Исследована возможность коробления стенки трубы, связанного с локальной потерей устойчивости трубы при обжатии со стороны грунта. Принято, что грунт оказывает динамическое прессовое и местное силовое давление на трубу, свойственное сейсмическим нагрузкам. Для расчета составной протяженной конструкции труба — грунт предложен программно-цифровой подход, ориентированный на построение 3D конечно-элементных моделей конструкции и расчеты в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке. Конструкция разбивается на объемные конечные элементы TSHELL, материал трубы берется упругопластическим, а среды — линейно-упругим. На боковой контактной поверхности трубы и среды взята односторонняя связь по нормали, касательные взаимодействия отсутствуют. Расчеты проведены для двух видов нагружения: обжатие и обжатие с дополнительным локальным ударом. Проведен сравнительный анализ полученных напряженных состояний. Отмечено появление пластических деформаций в трубе. Приведены расчеты конструкции труба — грунт по известным двумерным расчетным схемам.*

**Ключевые слова:** *стальной трубопровод, взаимодействие труба — среда, локальная устойчивость, расчет, метод конечных элементов, LS-DYNA*

**Введение.** Существует целый класс конструкций труб с внешним ограничением. К ним относятся: подземные стальные трубопроводы; туннели и каналы для транспортировки жидкостей и газов, усиленные стальными цилиндрами; трубы в бетонной оболочке; тонкостенные стальные лайнеры, используемые для восстановления поврежденных трубопроводов; вертикальные сэндвич-оболочки и другие составные оболочечные конструкции. В приведенных типичных примерах цилиндров с внешним ограничением важную роль играют боковые распределенные нагрузки, прикладываемые к наружной поверхности цилиндра, они способны вызывать коробление его стенки, связанное с локальной потерей устойчивости. Данный эффект малоизучен [1] в отличие от общепринятых методов расчета открытых трубопроводов (без внешних ограничений) [2]. Однако особые условия работы внешне ограниченных трубопроводов вызывают необходимость при оценке их несущей способности проводить расчеты на локальную устойчивость. В качестве внешне наведенных нагрузок на металлические трубы могут выступать гидростатические, гидродинамические, гравитационные, прессовые, ударные. Примером

воздействия на подземные трубопроводы могут служить сейсмические земные движения, большие ударно-скользящие движения разлома, тепловые расширения, водонасыщенная проницаемая среда грунта, термоусадка внешней полости и др.

Процесс деформирования труб зависит как от вида нагружения, так и от соотношения жесткостей труб и окружающих их сред. Если модуль упругости материала среды  $E'$  больше модуля упругости трубы  $E$ , то конструкция труба — среда относится к расчетной схеме «труба, окруженная жесткой границей»; в случае  $E' < E$  — к расчетной схеме «труба в окружении податливой границы». Подробный обзор литературы по обеим расчетным схемам приведен в работе [1]; в ней же выполнено исследование конструкции труба — среда на двумерной конечно-элементной модели с использованием программы ABAQUS. Решается квазистатическая задача плоского деформирования внешне ограниченного тонкостенного стального кольца при гидростатическом давлении, а также показана связь расчетных схем кольца с жесткой и податливой внешней границей. За начальное несовершенство принимается или начальное отклонение формы кольца, или начальная деформация кольца под действием единичной нагрузки. Геометрия кольца выбрана так, что  $100 \leq (D/h) \leq 300$ , где  $D$  и  $h$  — наружный диаметр и толщина кольца соответственно. Предложена приближенная методология расчета [1], которая является развитием известных аналитических подходов других авторов [3, 4].

Большое внимание в литературе уделяется сейсмическим воздействиям на подземные трубопроводные системы [5–11]. Анализ деформирования тонкостенных труб с поверхностными подкреплениями приведен в работах [12–15]. Механическое поведение металлических труб с внешними ограничениями рассмотрено в работах [16, 17].

Цель данной работы — предложить программный подход к расчету внешне ограниченных труб, учитывающий трехмерность конструкции, динамическое нагружение и технологические отклонения, свойственные реальным изделиям.

При прокладке подземных трубопроводов применяются трубы различных диаметров, например трубы диаметром  $D = 508$  мм с толщиной стенки  $h_c = 9,5$  мм (ГОСТ 10706—76), выполненные из стали 17Г1С. Принятые характеристики материала трубы приведены ниже:

Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> .....	7830
Модуль упругости $E$ , ГПа .....	200
Предел пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ , МПа .....	290
Предел текучести $\sigma_{\text{т}}$ , МПа .....	343
Предел прочности $\sigma_{\text{в}}$ , МПа .....	490
Удлинение при разрыве $\delta$ , % .....	20

По этим характеристикам построена в электронном виде истинная диаграмма деформирования (рис. 1), используемая в численных расчетах.

Внешней средой будем считать толстостенный цилиндр (рис. 2) с толщиной стенки  $h_c = 100$  мм, выполненный из линейно-упругого материала с модулем упругости  $E' = 40$  ГПа, коэффициентом Пуассона  $\nu = 0,2$ , коэффициентом линейного расширения  $\alpha' = 3 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ .

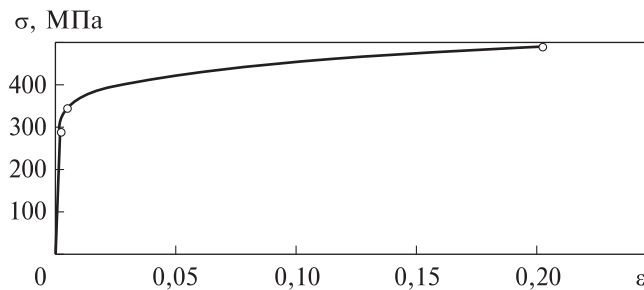


Рис. 1. Диаграмма деформирования материала трубы

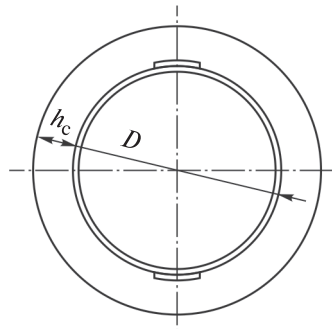


Рис. 2. Схема конструкции труба — среда

Согласно принятым геометрическим и механическим характеристикам конструкции труба — среда, она относится к расчетной схеме трубы с податливой внешней границей, так как  $E' < E$ . По показателю  $\frac{D}{h} = 53$  данная конструкция является более жесткой, чем исследованная в работе [1]. Кроме того, сведение расчета трубопровода [1] к плоской двумерной задаче не позволяет учитывать протяженность трубопровода, а значит, и наличие возможных локальных технологических отклонений, таких, например, как местное изменение, в пределах заданных допусков, толщины или модуля упругости трубы и среды. Важно также рассмотреть не только гидростатическое

нагружение трубы [1], когда ко всей ее наружной поверхности прикладывается равномерно распределенное внешнее давление  $p$ , но и обжатие трубы средой за счет гравитационных, прессовых и ударных нагрузок. Распределенные воздействия можно задать условным нагревом трубы или охлаждением среды, а местные ударные воздействия — приложением давления  $p_1$  к наружной поверхности трубы в локальной области  $s_1$  (рис. 3).

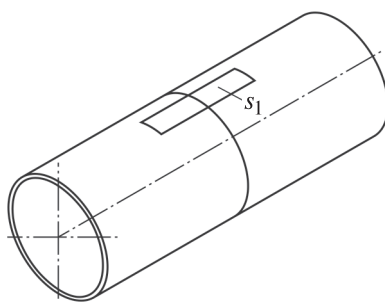


Рис. 3. Наружная поверхность трубы

**Модель деформирования.** Принимая во внимание выделенные особенности конструкции труба — среда, представим модель ее деформирования в виде составного цилиндра (см. рис. 2) в податливой внешней среде ( $E' < E$ ) и с односторонней связью по нормали на цилиндрической поверхности контакта диаметром  $D$ . Касательными взаимодействиями на поверхности контакта пренебрежем. Труба деформируется упругопластически, среда — линейно-упруго. Технологическое отклонение зададим посредством вырезов (см. рис. 2) в среде глубиной  $h_v = 10$  мм, шириной (по дуге) 100 мм и длиной  $l = 250$  мм. Нагружение конструкции будем осуществлять охлаждением среды и приложением локального давления  $p_1$  в зоне вырезов. Длина конструкции (см. рис. 3)  $L = 1500$  мм. Вырезы расположены в центре конструкции симметрично относительно центральной горизонтальной плоскости. Схема всей конструкции труба — среда выбрана так, что в ней существуют три центральные плоскости симметрии: продольные горизонтальная и вертикальная и поперечная вертикальная. Данная схема дает возможность, учитывая симметрию, рассматривать только 1/8 часть конструкции (рис. 4) и в расчете методом конечных элементов существенно снизить размерность задачи.

Конечно-элементную модель конструкции формируем из оболочечных элементов типа \*ELEMENT\_TSHELL. По толщине трубы берем три слоя конечных элементов, по толщине среды — десять слоев.

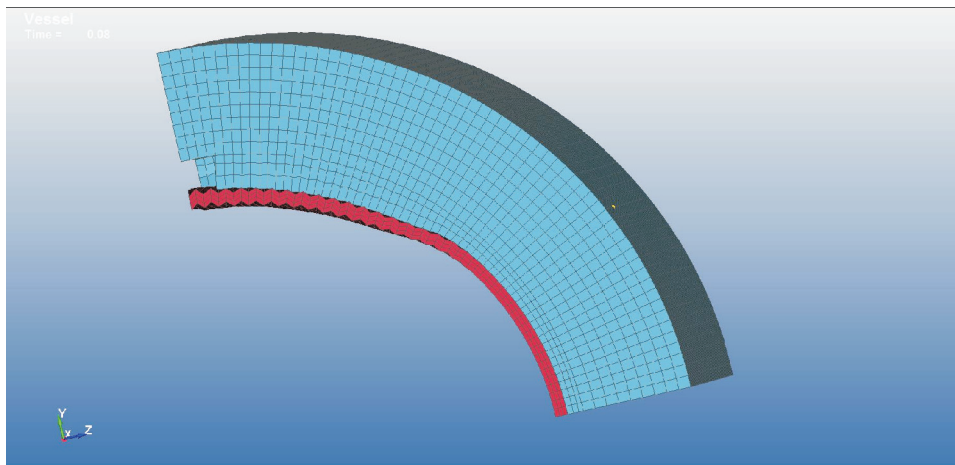


Рис. 4. Конечно-элементная модель конструкции труба — среда

Во внутреннем слое среды размещаем вырезы. Упруго-пластический материал трубы моделируем командой `*MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY`, линейно-упругий материал среды — командой `*MAT_ELASTIC`.

Одностороннюю связь на поверхности контакта проводим командой `*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE`.

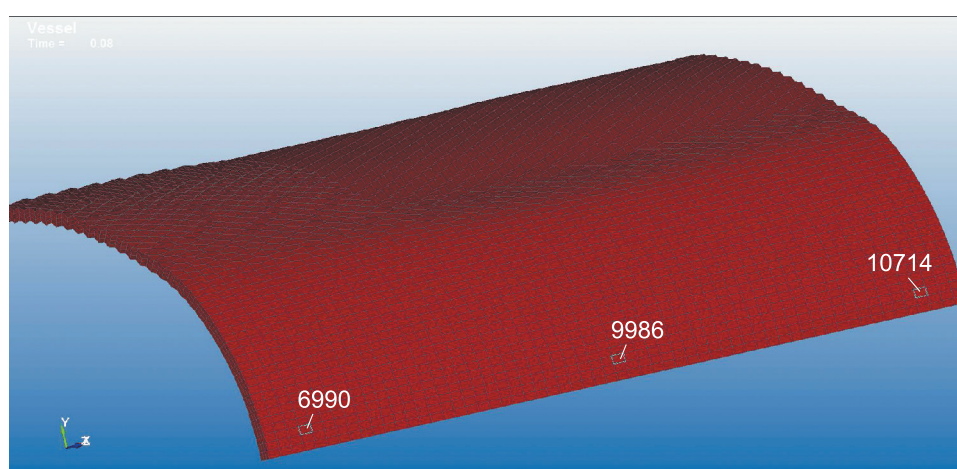
Геометрические граничные условия задаем, обнуляя перемещения по осям на трех плоскостях симметрии. Нагружение конструкции труба — среда осуществляем охлаждением среды, вызывающим обжатие (прессовое) трубы, и местным приложением к трубе давления  $p_1$  в течение времени  $\tau = 0,08$  с. Расчеты проводим в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке.

**Анализ результатов.** Сравним результаты расчетов конструкции труба — среда ( $E' < E$ ) по двум схемам нагружения: обжатие трубы и обжатие трубы с локальным давлением  $p_1$ .

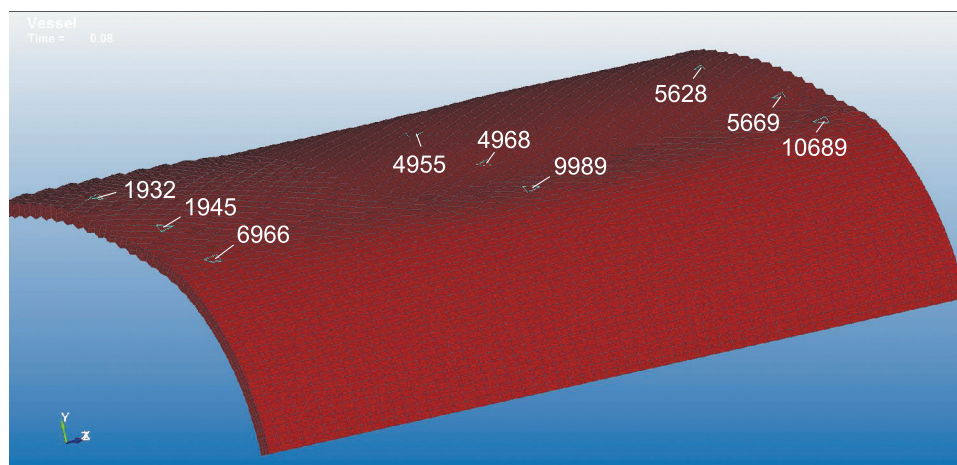
**Обжатие трубы.** Зададим такую температуру охлаждения среды, чтобы на поверхности трубы возникало осредненное контактное давление  $p = 9$  МПа. Такое давление соответствует тяжелым условиям работы трубы, связанным, например, с сейсмическими воздействиями. Это давление более чем на порядок превышает значение при обычных условиях работы подземного трубопровода, поэтому полученные высокие напряжения не следует сопоставлять с предельными величинами. Однако выбранное значение давления  $p$  дает возможность более наглядно рассмотреть процесс деформирования трубы с податливой внешней границей.

На наружной деформированной ( $\tau = 0,08$  с) поверхности трубы выделим две области: вблизи горизонтальной (рис. 5) и вблизи

вертикальной (рис. 6) плоскости симметрии конструкции. Отметим, что на рис. 5 и 6 средствами визуализации убрана внешняя среда, зоны вырезов в среде расположены со стороны элементов А6990 (см. рис 5), А1932 (см. рис. 6). Горизонтальные элементы А, В, С, расположенные вдали от технологических отклонений среды, дают представление о напряженно-деформированном состоянии трубы в области минимальных перемещений (рис. 7). Здесь максимальные полные перемещения составляют 4 мм, пластические деформации (рис. 8) — 0,48 %, окружные напряжения (рис. 9) — 310 МПа.



**Рис. 5.** Расположение конечных элементов на наружной поверхности трубы вблизи горизонтальной плоскости симметрии



**Рис. 6.** Расположение конечных элементов на наружной поверхности трубы вблизи вертикальной плоскости симметрии

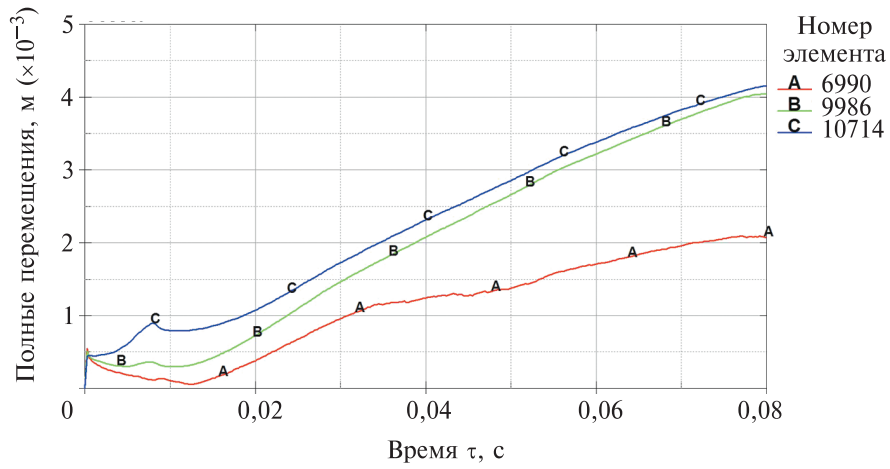


Рис. 7. Полные перемещения элементов A, B, C ( $p_1 = 0$ )

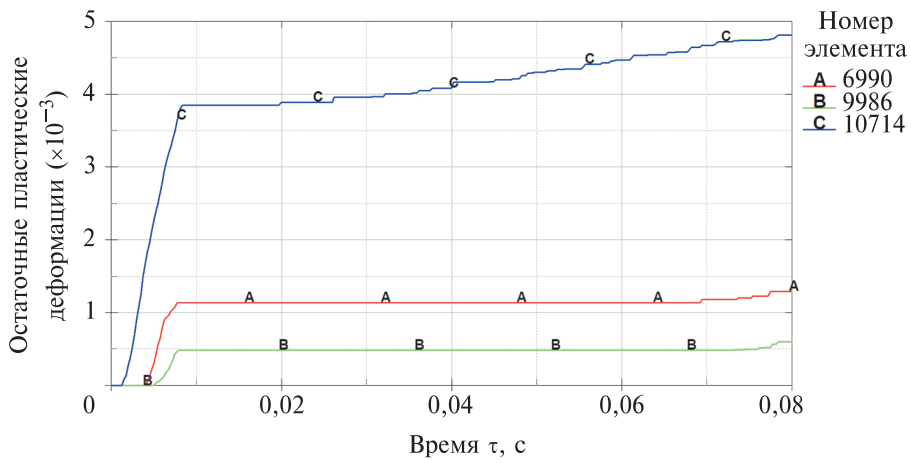


Рис. 8. Остаточные пластические деформации элементов A, B, C ( $p_1 = 0$ )

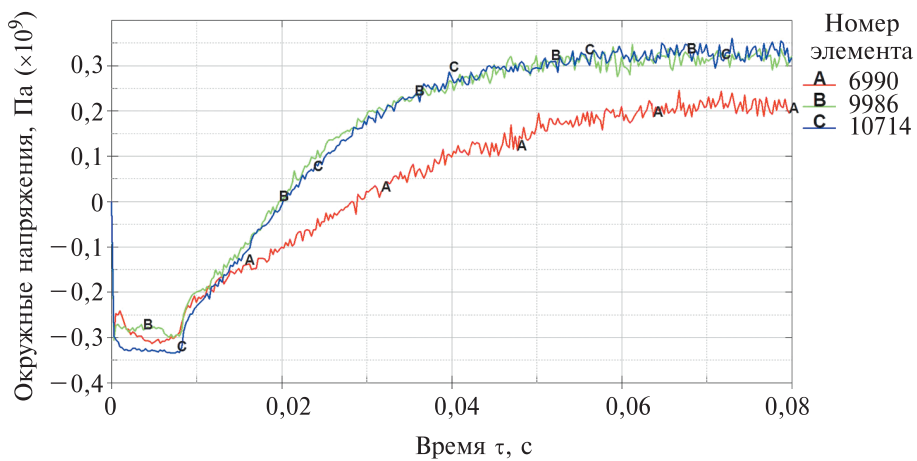


Рис. 9. Окружные напряжения элементов A, B, C ( $p_1 = 0$ )



По графику изменения во времени окружных напряжений (см. рис. 9) можно судить о начале коробления стенки трубы (до  $\tau = 0,01$  с), возникновения продольной изгибной складки локальной потери устойчивости трубы и дальнейшем увеличении амплитуды складки, что подтверждается графиками полных перемещений (рис. 10) вертикальных элементов (А–І). Наибольшие перемещения элемента В (см. рис. 10) составляют 24 мм, размеры складки меняются как по длине, так и ширине. Максимальные пластические деформации (рис. 11) составляют 5,2 %. Полученные данные свидетельствуют о том, что продольные складки на трубе зарождаются в зоне технологических отклонений (вырезов) в среде и развиваются по мере удаления от них.

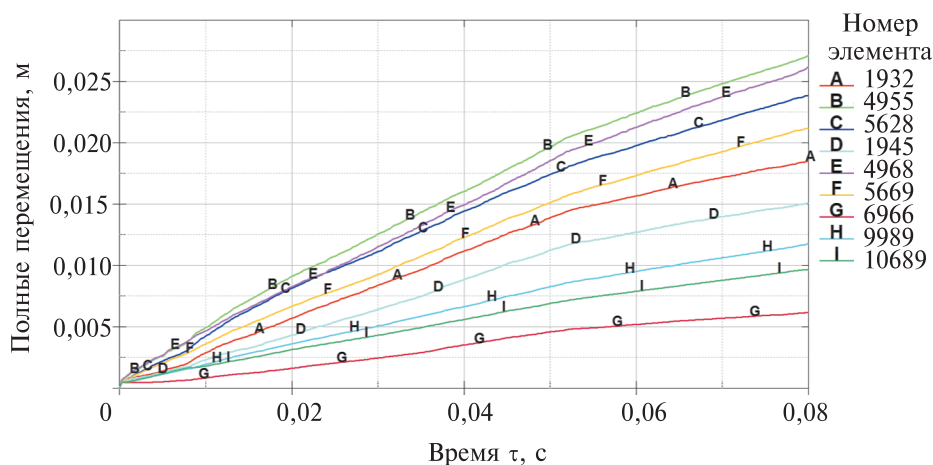


Рис. 10. Полные перемещения элементов А–І ( $p_1 = 0$ )

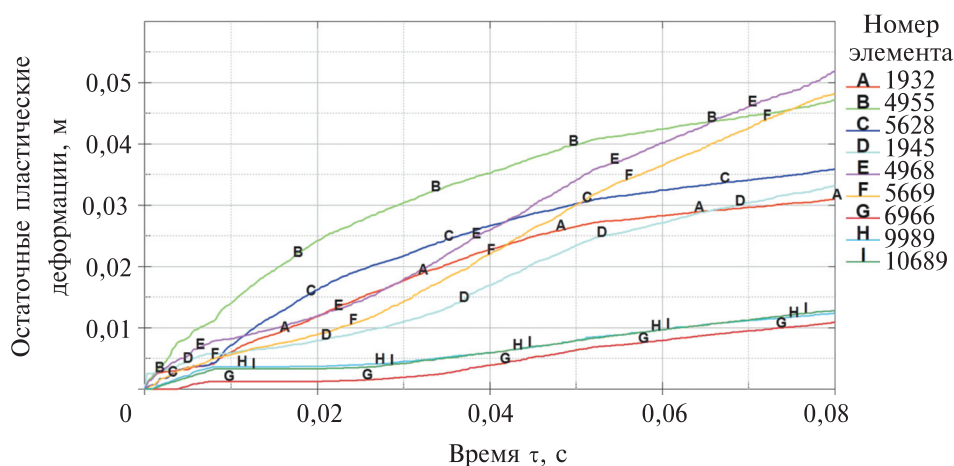


Рис. 11. Остаточные пластические деформации элементов А–І ( $p_1 = 0$ )



**Обжатие трубы и местное давление  $p_1$ .** Такое нагружение конструкции труба — среда может появляться при местном гидроударе одновременно с сейсмическим воздействием. Пусть осредненное по поверхности трубы давление обжатия, как и в предыдущем случае, будет  $p = 9$  МПа, давление  $p_1 = 1$  МПа. Расчеты показывают, что характер деформирования трубы аналогичен тому, что отмечен в первой схеме нагружения, где было только обжатие. Влияние давления  $p_1$  сказывается на увеличении амплитуды полных перемещений горизонтальных элементов А, В, С (рис. 12) и вертикальных элементов А–I (рис. 13). Максимальные перемещения на горизонтали (см. рис. 12) равны 4,4 мм, на вертикали — 29 мм. Окружные напряжения на горизонтали (рис. 14) по величине близки к окружным напряжениям (см. рис. 9) первой схемы нагружения (при  $\tau = 0,08$  с), но имеют укороченный начальный участок сжатия, что характеризует более быстрое начало коробления трубы. Исходя из графика горизонтальных перемещений точек трубы (рис. 15) можно сделать вывод о начальном смещении точек внутрь трубы (до  $\tau = 0,01$  с) с последующим прогибом наружу до максимального значения, равного 4,3 мм.

Таким образом, из проведенных расчетов следует, что в обеих рассмотренных схемах нагружения при  $p = 9$  МПа происходит коробление стенки трубы и отмечается локальная потеря устойчивости трубы.

Сопоставим данный результат с расчетами критических давлений по имеющимся в литературе аналитическим и полуэмпирическим формулам:

для свободной упругой трубы критическое давление, МПа, [2]

$$p_{кр} = \frac{2E}{(1-\nu^2)} \left( \frac{h}{D} \right)^3 = 2,87 ;$$

для упругой трубы с жесткой внешней границей ( $E' \gg E$ ), МПа, [3]

$$p_{G1} = \frac{E}{1-\nu^2} \left( \frac{h}{D} \right)^{2,2} = 34,68 ;$$

для упругопластической трубы с жесткой внешней границей ( $E' \gg E$ ) и с начальным отклонением формы  $\delta_0$  [4]

$$p_m = \frac{14,1\sigma_T}{1+1,2(\delta_0/h)} \left( \frac{h}{D} \right)^{1,5} = 11 \text{ (МПа) при } \delta_0 = 1 \text{ мм;}$$

$$p_m = 7,58 \text{ МПа при } \delta_0 = 5 \text{ мм;}$$

$$p_{m0} = 12,37 \text{ МПа при } \delta_0 = 0 \text{ мм.}$$

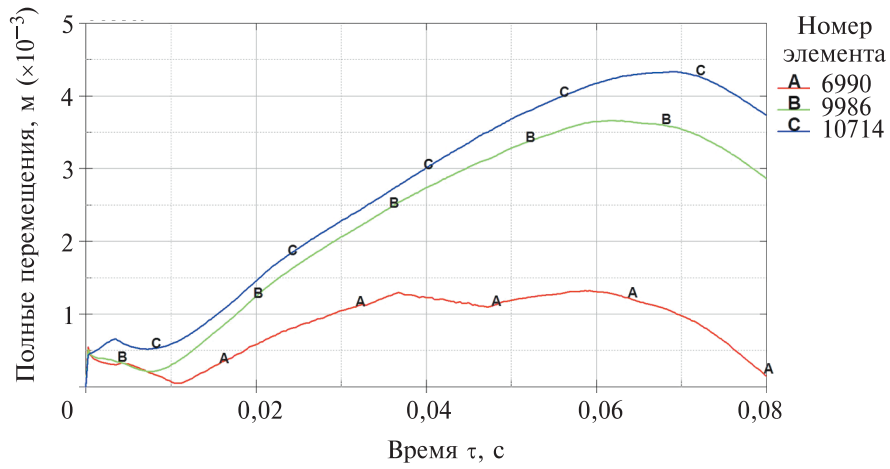


Рис. 12. Полные перемещения элементов А, В, С ( $p_1 = 1$  МПа)

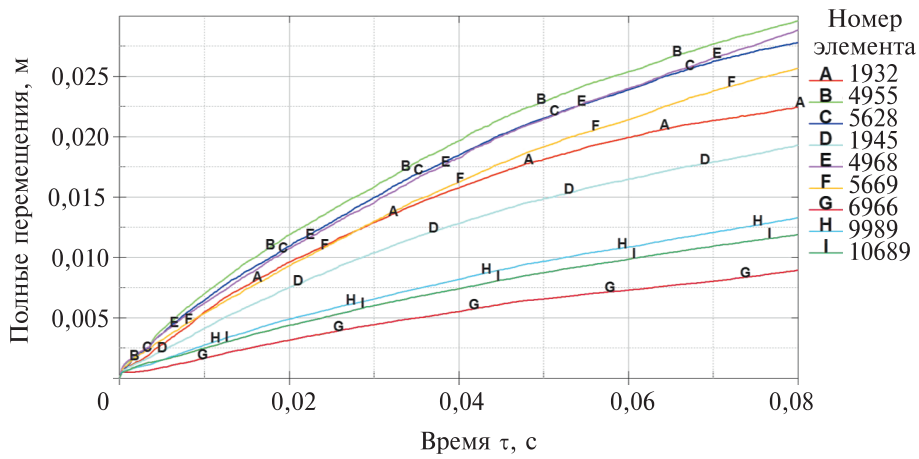


Рис. 13. Полные перемещения элементов А–I ( $p_1 = 1$  МПа)

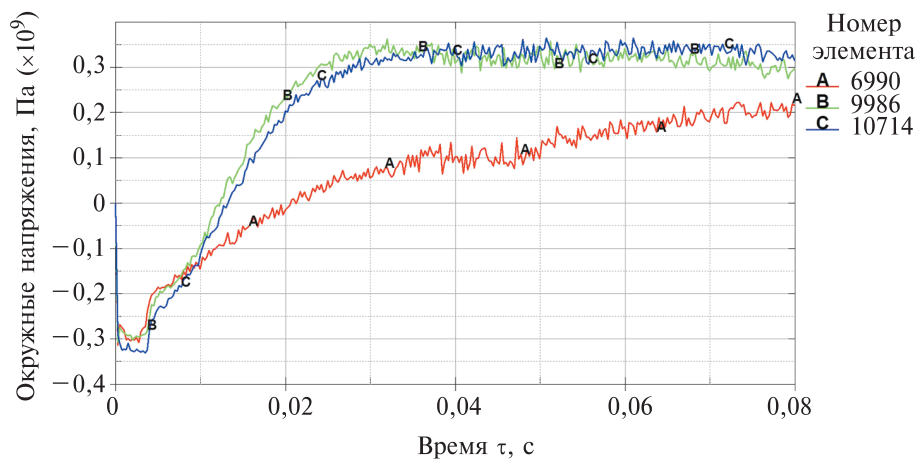


Рис. 14. Окружные напряжения элементов А, В, С ( $p_1 = 1$  МПа)

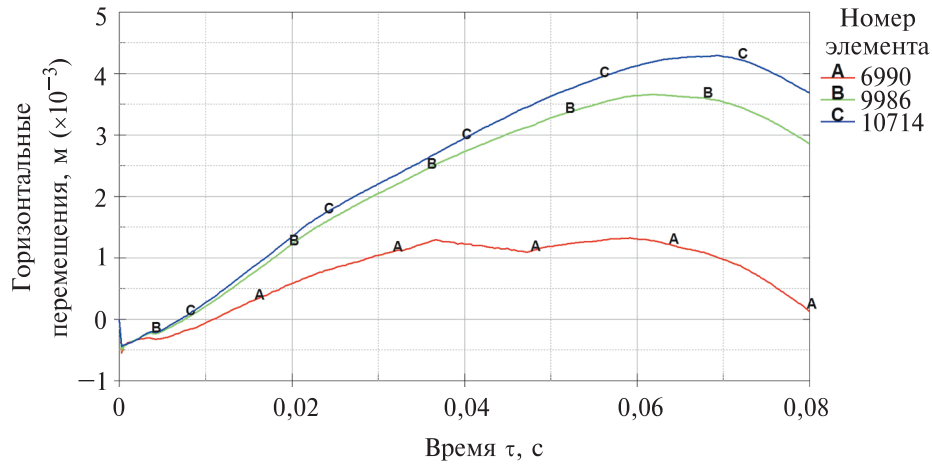


Рис. 15. Горизонтальные перемещения элементов А, В, С ( $p_1 = 1$  МПа)

Давление перехода всего объема трубы в пластическое состояние [1] будет, МПа,

$$p_T = 2,26\sigma_T \left( \frac{h}{D} \right) = 14,5 ;$$

а по методологии работы [1] для конструкции труба — среда:

$$p_{\max} = p_{m0} = 12,37 \text{ МПа при } \frac{E}{E'} = 5;$$

$$p_{\max} = 12,31 \text{ МПа при } \frac{E}{E'} = 20;$$

$$p_{\max} = 10 \text{ МПа при } \frac{E}{E'} = 200.$$

Различия в значениях найденного критического давления для конструкции труба — среда, обусловленные разными уровнями введенных допущений, подтверждают необходимость учета пластических деформаций.

### Выводы

1. Предложено программное решение задачи потери устойчивости трубы, окруженной внешней податливой средой и нагруженной пресовым и ударным давлением. Используется нелинейный конечно-элементный анализ объемного напряженно-деформированного состояния в программном комплексе LS-DYNA в динамической постановке с учетом малых технологических отклонений.

2. Численные расчеты конструкции труба — среда  $\left( \frac{E}{E'} = 5 \right)$  показали совпадение форм локальной потери устойчивости трубы

в виде продольной складки при обжатии трубы охлажденной средой и при дополнительном местном боковом давлении на трубу; различие состоит в размерах складок.

3. Сопоставление результатов численного расчета конструкции труба — среда с известными приближенными решениями подтвердило возникновение пластических деформаций в трубе.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Vasilikis D., Karamanos S.A. Mechanics of Confined Thin-Walled Cylinders Subjected to External Pressure. *Applied Mechanics Reviews, ASME*, 2014, vol. 66, Article Number 010801.
- [2] Феодосьев В.И. *Сопротивление материалов*. 16-е изд., испр. Москва, Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. ISBN 978-5-7038-3874-7
- [3] Glock D. Überkritisches Verhalten eines Starr Ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von Aussen und Temperaturerhöhung [Post-critical behavior of a rigidly encased circular pipe subject to external water pressure and thermal rise]. *Der Stahlbau*, 1977, Bd. 46, No. 7, S. 212–217.
- [4] Montel R. Formule Semi-Empirique pour la Determination de la Pression Exterieur Limite d’Instabilite des Conduits Metalliques Lisses Noyees dans du Beton. *La Houille Blanche*, 1960, 15 (5), pp. 560–568.
- [5] Tsinidis G., Di Sarno L., Sextos A., Furtner P. A Critical Review on the Vulnerability Assessment of Natural Gas Pipelines Subjected to Seismic Wave Propagation. Part 2: Pipe Analysis Aspects. *Tunnelling and Underground Space Technology*, July 2019. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103056
- [6] Chaloulos Y.K., Bouckovalas G.D., Karamitros D.K. Trench effects on lateral p-y relations for pipelines embedded in stiff soils and rocks. *Computers and Geotechnics*, 2017, no. 83, pp. 52–63.
- [7] Jahangiri V., Shakib H. Seismic risk assessment of buried steel gas pipelines under seismic wave propagation based on fragility analysis. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, vol. 16 (3), pp. 1571–1605.
- [8] Lee D.H., Kim B.H., Jeong S.H., Jeon J.S., Lee T.H. Seismic fragility analysis of a buried gas pipeline based on nonlinear time-history analysis. *International Journal of Steel Structures*, 2016, vol. 16 (1), pp. 231–242.
- [9] Psyrras N., Sextos A. Safety of buried steel natural gas pipelines under earthquake-induced ground shaking: A review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, vol. 106, pp. 254–277.
- [10] Psyrras N., Kwon O., Gerasimidis S., Sextos A. Can a buried gas pipeline experience local buckling during earthquake ground shaking? *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, vol. 116, pp. 511–529.
- [11] Vazouras P., Dakoulas P., Karamanos S.A. Pipe-soil interaction and pipeline performance under strike slip fault movements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, vol. 72, pp. 48–65.
- [12] Каледин В.О., Аникина Ю.В. Численное моделирование статики и устойчивости подкрепленных оболочек с расслоениями. *Вестник Томского государственного университета*, 2006, № 19, с. 225–232.
- [13] Дубровин В.М., Бутина Т.А. Моделирование деформирования упругого основания в составной цилиндрической оболочке. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 11.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1553>

- [14] Бутина Т.А., Дубровин В.М. Моделирование ударно-волновых процессов в элементах многослойных конструкций с учетом начального внутреннего давления. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2016, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1549>
- [15] Бяков К.Е., Сорокин Ф.Д., Машков К.Ю., Попков М.В. Стенд для исследования контактного взаимодействия в системе грунт — эластичная оболочка — генератор волны эластовинтового движителя. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 8 (665), с. 42–48.
- [16] Егоров В.Н., Егоров А.В. Обжатие тонкостенного цилиндра наружной упругой средой. *Авиационная промышленность*, 2019, № 3–4, с. 22–26.
- [17] Егоров А.В. Устойчивость цилиндрических оболочек в жесткой среде. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1670>

Статья поступила в редакцию 12.01.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Егоров А.В. Анализ деформирования внешне ограниченных металлических труб. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 2. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-2-2056>

**Егоров Антон Витальевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Космические аппараты и ракеты-носители», МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: [antegor177@mail.ru](mailto:antegor177@mail.ru)  
SPIN-код 7513-3026  
ORCID iD 0000-0002-7401-5534

## Analysis of deformation of externally confined metal pipes

© A.V. Egorov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*Pipes with an external confinement include structures of the pipe — soil type, in which the modulus of elasticity of the soil is less than that of a metal pipe. The possibility of warping of the pipe wall associated with a local loss of pipe stability when compressed from the medium is investigated. It is assumed that the soil exerts dynamic pressure and local force pressure on the pipe, which is characteristic of seismic loads. A software-digital approach is proposed for calculating the separable extended structure of pipe — soil, which focuses on the construction of 3D finite element models of the structure and calculations in the LS-DYNA software package in a dynamic formulation. The structure is divided into three-dimensional TSHELL finite elements, the pipe material is taken as elastic-plastic, and the medium is linear-elastic. On the side contact surface between the pipe and the medium a normal unilateral constraint is taken, there are no tangential interactions. Calculations are carried out for two types of loading: swaging and swaging with additional local impact. A comparative analysis of the obtained stress states is performed. The appearance of plastic deformations in the pipe is noted. The calculations according to the known two-dimensional calculation schemes of the pipe — soil structure are given.*

**Keywords:** steel pipeline, pipe — medium interaction, local stability, calculation, finite element method, LS-DYNA

### REFERENCES

- [1] Vasilikis D., Karamanos S.A. *Applied Mechanics Reviews*, ASME, 2014, vol. 66, Article Number 010801.
- [2] Feodosyev V.I. *Soprotivleniye materialov* [Strength of materials]. Moscow, BMSTU Publ., 2016. ISBN 978-5-7038-3874-7
- [3] Glock D. *Der Stahlbau*, 1977, Bd. 46, No. 7, S. 212–217.
- [4] Montel R. *La Houille Blanche*, 1960, vol. 15 (5), pp. 560–568.
- [5] Tsinidis G., Di Sarno L., Sextos A., Furtner P. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, no. 92. DOI: 10.1016/j.tust.2019.103056
- [6] Chaloulos Y.K., Bouckovalas G.D., Karamitros D.K. *Computers and Geotechnics*, 2017, no. 83, pp. 52–63.
- [7] Jahangiri V., Shakib H. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, vol. 16 (3), pp. 1571–1605.
- [8] Lee D.H., Kim B.H., Jeong S.H., Jeon J.S., Lee T.H. *International Journal of Steel Structures*, 2016, vol. 16 (1), pp. 231–242.
- [9] Psyrras N., Sextos A. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, vol. 106, pp. 254–277.
- [10] Psyrras N., Kwon O., Gerasimidis S., Sextos A. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, vol. 116, pp. 511–529.
- [11] Vazouras P., Dakoulas P., Karamanos S.A. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2015, vol. 72, pp. 48–65.
- [12] Kaledin V.O., Anikina Yu.V. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta — Tomsk State University Journal*, 2006, no. 19, pp. 225–232.
- [13] Dubrovin V.M., Butina T.A. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1553>



- [14] Butina T.A., Dubrovin V.M., *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2016, iss. 11.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2016-11-1549>
- [15] Byakov K.E., Sorokin F.D., Mashkov K.Yu., Popkov M.V. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 8 (665), pp. 42–48.
- [16] Egorov V.N., Egorov A.V. *Aviatsionnaya promyshlennost — Aviation Industry*, 2019, no. 3–4, pp. 22–26.
- [17] Egorov A.V. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2017, iss. 9.  
<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-9-1670>

**Egorov A.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Spacecraft and Launch Vehicles, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: [antegor177@mail.ru](mailto:antegor177@mail.ru)