

## Напряжённо-деформированное состояние трехслойной трубчатой конструкции при воздействии равномерно распределенной импульсной нагрузки

*Х.М. Муселемов<sup>1</sup>, Д.Р. Маилян<sup>2</sup>, Д.У. Муселемов<sup>3</sup>*

*<sup>1</sup>Дагестанский государственный технический университет, Российская Федерация, г. Махачкала*

*<sup>2</sup>Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** В статье рассматривается расчёт трёхслойной трубчатой конструкции и дается оценка надёжности её применения. С этой целью здесь исследуется напряженно-деформированное состояние трехслойной трубчатой конструкции под действием равномерно распределенной импульсной нагрузки на стенку. Трубы в настоящее время занимают важные позиции в инфраструктурах многих стран. С каждым годом к этим конструкциям предъявляются новые требования безопасности. Стратегические объекты выполняют задачу по обеспечению людей необходимой энергией. Здесь определены перемещения трубы в узлах ее стенки, даны продольные напряжения ( $N_x$ ) и кольцевые напряжения ( $N_y$ ) в элементах трубы. Определены перемещения в указанных выше узлах. Напряжения ( $N_x$ ) даны для элементов наружного и внутреннего несущих слоев. Для этих же слоев вычислены кольцевые напряжения ( $N_y$ ). Дана оценка работы некоторых вариантов под действием нагрузки, дано сравнение максимальных продольных и кольцевых напряжений. На основании этого сделан вывод, что при прочих равных условиях трехслойная труба из алюминия более надежна при воздействии импульсных нагрузок, чем сплошностенчатая стальная труба.

**Ключевые слова:** трёхслойная трубчатая конструкция, сплошностенчатая труба, несущий слой, импульсная нагрузка, наполнитель, перемещения, напряжения

Трубопровод воспринимает давления транспортируемой среды, трение этой среды об стенки трубы, температурные воздействия и гидравлический удар [1, 2]. В последнее время при проектировании этих конструкций приходится иметь дело с различными импульсными воздействиями на трубу, вызванными различными факторами.

Трубопроводный транспорт применяется для транспортирования различных агрегатных сред. При транспортировке среды могут возникать разные ситуации, которые обусловлены резким увеличением объема среды (импульсное расширение). В связи с чем, учёт влияния импульсных воздействий на работу трубы является важной задачей, которая позволяет

находить усилия и деформации стенки трубы, подобрать толщину этой стенки [3 - 5]. Исследования трехслойных труб, проведенные в ДГТУ, свидетельствуют, что эти трубы обладают повышенной жёсткостью при изгибе. Это позволяет уменьшить собственный вес конструкции. С целью улучшения эксплуатационных качеств трубы рационально использовать трехслойную цилиндрическую оболочку (трубу) [6], которая состоит из двух несущих слоев и дискретного заполнителя [7-9]. Конструктивная схема этой трубы дана на схеме.

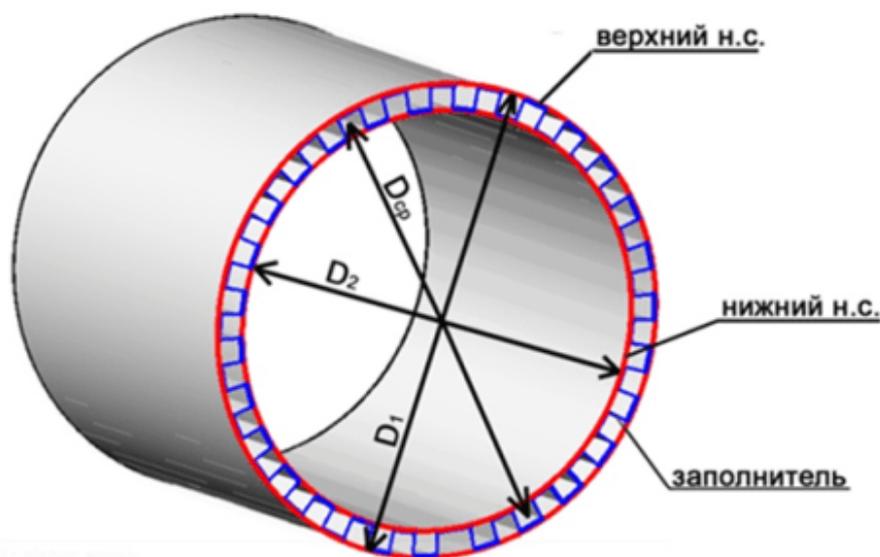


Рис. 1. – Общий вид трехслойной трубы

Анализ работы данной трубы [6] позволяет сделать вывод о том, что наиболее удобной технологией является форма в виде гофра (рис. 2) [9 - 11].

Ранее нами были исследованы вопросы обоснования применения заполнителя в виде гофры [9] и дано напряженно-деформированное состояние в трехслойных и сплошностенчатых трубах при действии статических нагрузок [9 - 11].

В настоящей статье дается исследование НДС трехслойной трубы [9] при действии распределенной импульсной нагрузки на стенку трубы [12 - 14]. Применяется метод конечных элементов (МКЭ) [15-17], который реализован на ПК «ЛИРА» [18 -20].

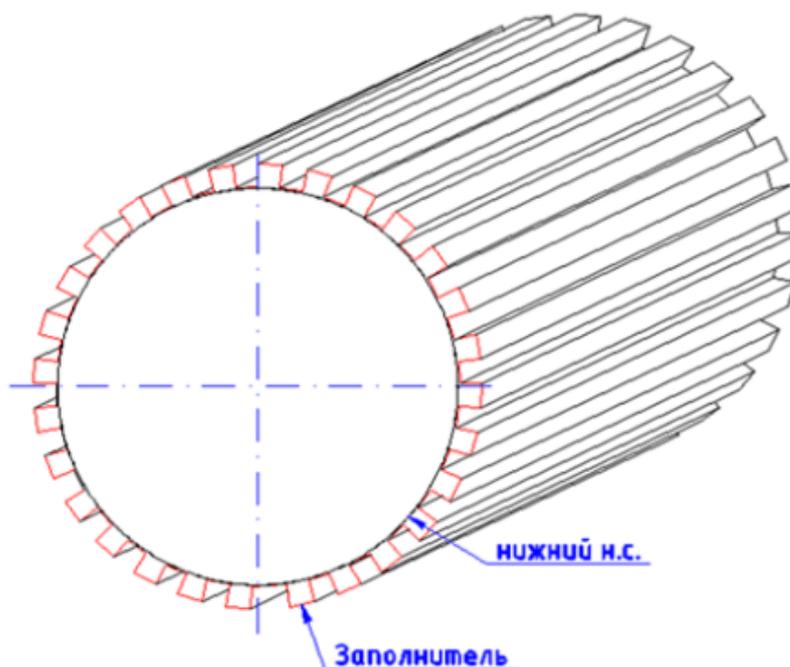


Рис. 2. – Заполнитель для трехслойной трубы в виде гофра

Рассматривается задача влияния на обшивку трубы распределенной импульсной нагрузки, которая приложена на участки длиной 1 в метр и полосовой нагрузки по внутреннему ободу стенки трубы.

Для оценки напряженно-деформированного состояния рассматриваются два варианта трубы: сплошностенчатая – диаметром  $D = 900$  мм, толщиной 10 мм (рис. 3а) и трехслойная –  $D_1 = 950$  мм,  $D_2 = 900$  мм,  $D_{cp} = 925$  мм, и толщиной несущих слоев 1 мм и ребер 0,2 мм (рис. 3б).

В качестве материала сплошностенчатой трубы принята сталь марки Ст3сп ГОСТ 10706-76 «Трубы стальные электросварные прямошовные. Технические требования» и ГОСТ 10704-91 «Трубы стальные электросварные прямошовные. Сортамент» с расчетными характеристиками  $\rho=7,85\text{т/м}^3$ ,  $E=2,1\times 10^7\text{т/м}^2$ . Для трехслойных труб был использован алюминий марки АМГ с расчетными характеристиками  $\rho=2,78\text{т/м}^3$ ,  $E=0,69\times 10^7\text{т/м}^2$  [21, 22]. Для изготовления трехслойных труб можно использовать и другие материалы [23, 24].

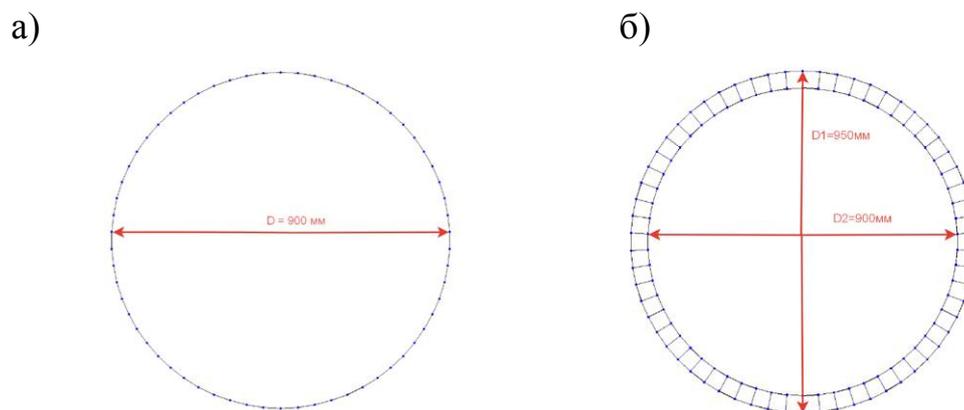


Рис. 3. – Сечения труб

Расчетной моделью может служить фрагмент бесконечной трубы длиной 3 м. На этом фрагменте трубы выполняется исследование напряженно-деформированное состояние стенки под действием импульсной нагрузки. Влияние отброшенных частей трубы учитывается жесткой заделкой концов фрагмента. В данной задаче не рассматривается деформирование трубы на участках ее крепления.

Импульсная нагрузка приложена по внутреннему контуру на участке трубы длиной в 1 метр (рис. 4). Нагрузка действует изнутри во внешнюю сторону трубы, по радиусу.

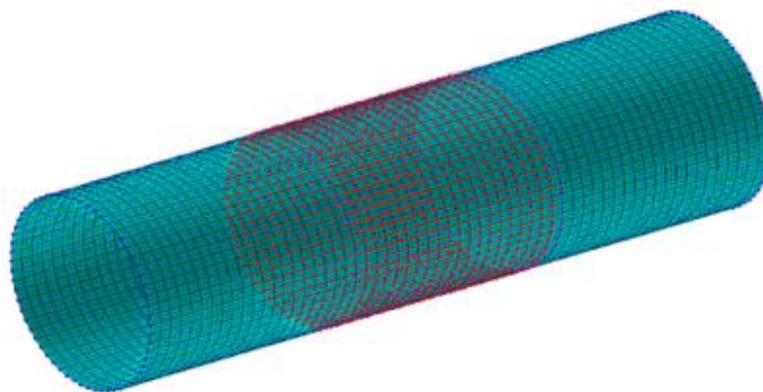


Рис. 4. – Схема приложения нагрузки

В статье не рассматривается конкретный случай приложения импульсной нагрузки. Поэтому, для оценки работы трубы, за основу была принята нагрузка в виде усредненной величины силы импульса интенсивностью 0,5 т на расчетную площадку поверхности трубы ( $0,0023\text{м}^2$ ).

Время действия импульса принято 0,1 сек, что вполне соответствует времени воздействия реальных импульсных воздействий. Размеры расчетной площадки определены с учетом степени дискретизации поверхности стенки трубы.

Нагрузка распределена равномерно по внутренней поверхности трубы на участке длиной в 1 метр (рис 4). Для сплошностенчатой трубы вычислены перемещения в узлах стенки трубы (рис. 5), а также найдены продольные напряжения ( $N_x$ ) и кольцевые напряжения ( $N_y$ ) в элементах стенки трубы (рис. 7, 8). В трехслойной трубе перемещения определены в узлах стенки трубы (рис. 6). Продольные напряжения ( $N_x$ ) вычислены для элементов наружного несущего слоя (рис. 9) и внутреннего несущего слоя (рис. 11). А кольцевые напряжения ( $N_y$ ) даны для элементов наружного и внутреннего несущих слоев (рис. 10-12). Результаты расчетов сведены в таблицу 1.

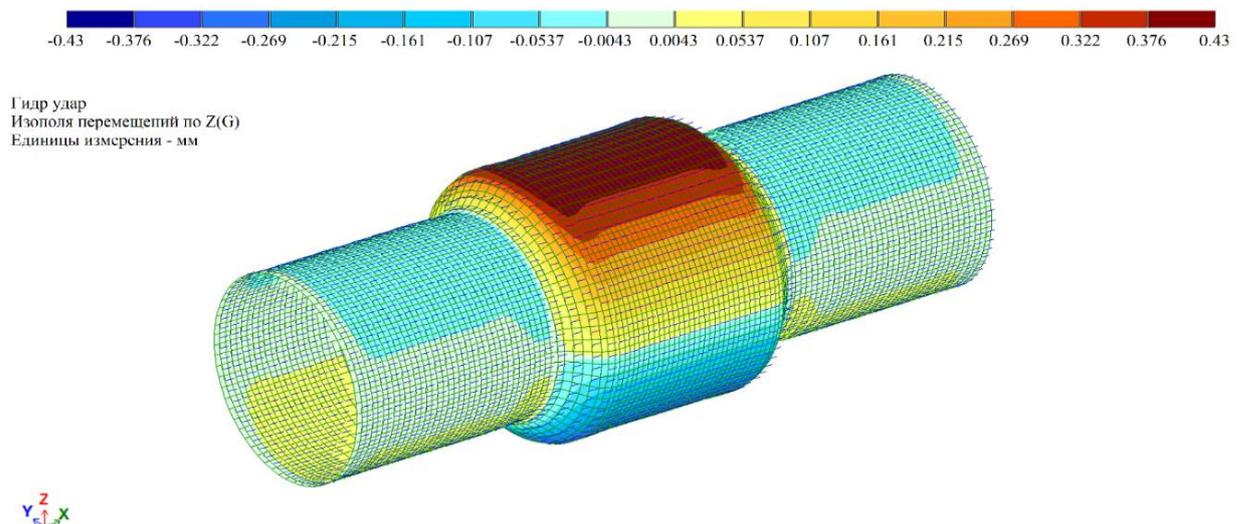


Рис. 5. – Перемещения в сплошностенчатой трубе при распределенном импульсе

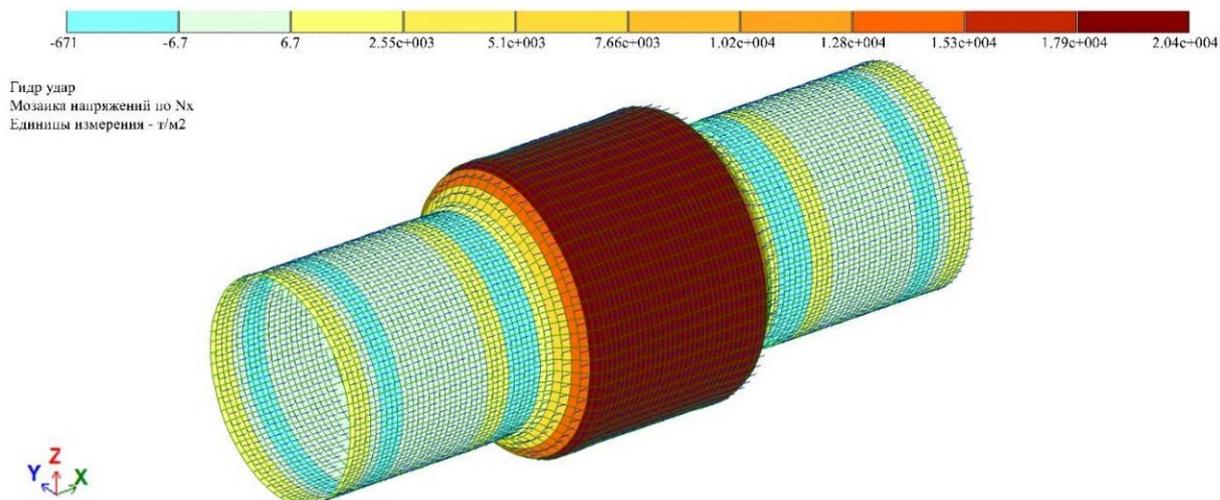


Рис. 6. – Перемещения в трехслойной трубе при распределенном импульсе

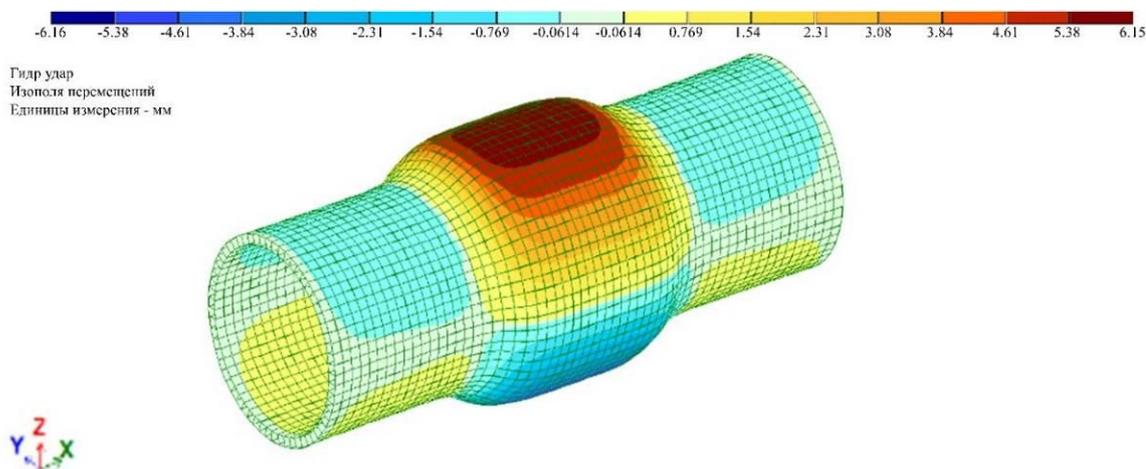


Рис. 7. – Усилия  $N_x$  в стенке сплошностенчатой трубы при распределенном импульсе

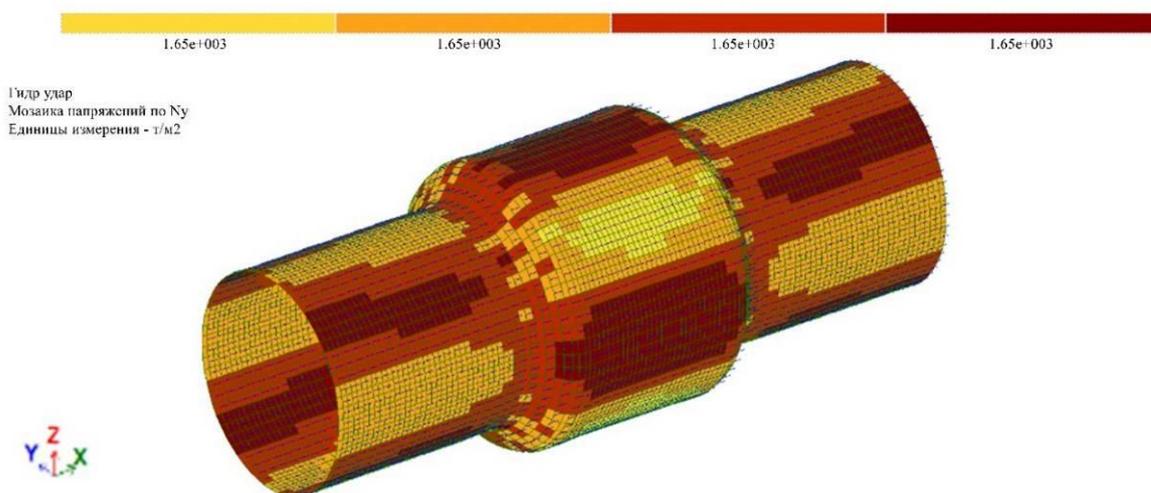


Рис. 8. – Усилия  $N_y$  в стенке сплошностенчатой трубы при распределенном импульсе

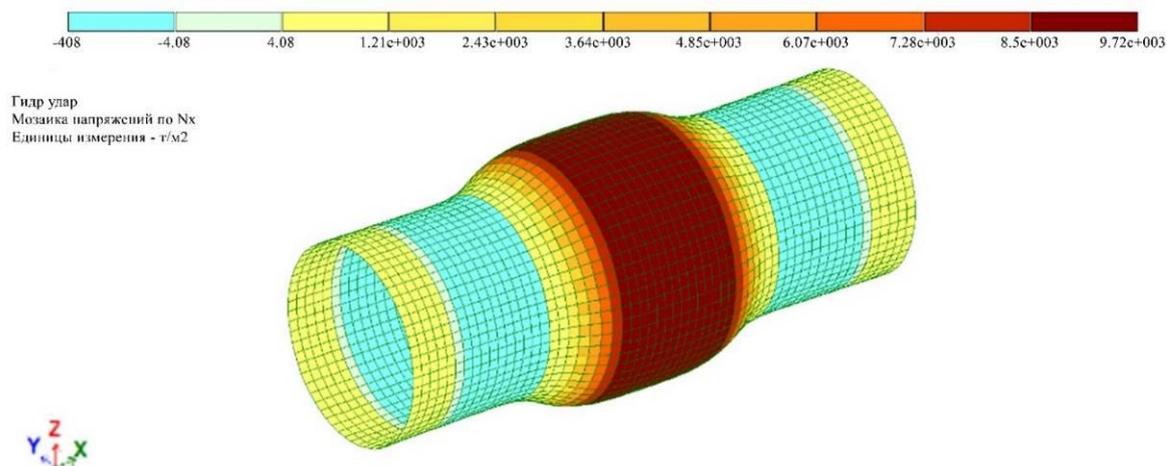


Рис. 9. – Усилия  $N_x$  в наружной стенке трехслойной трубы при распределенном импульсе

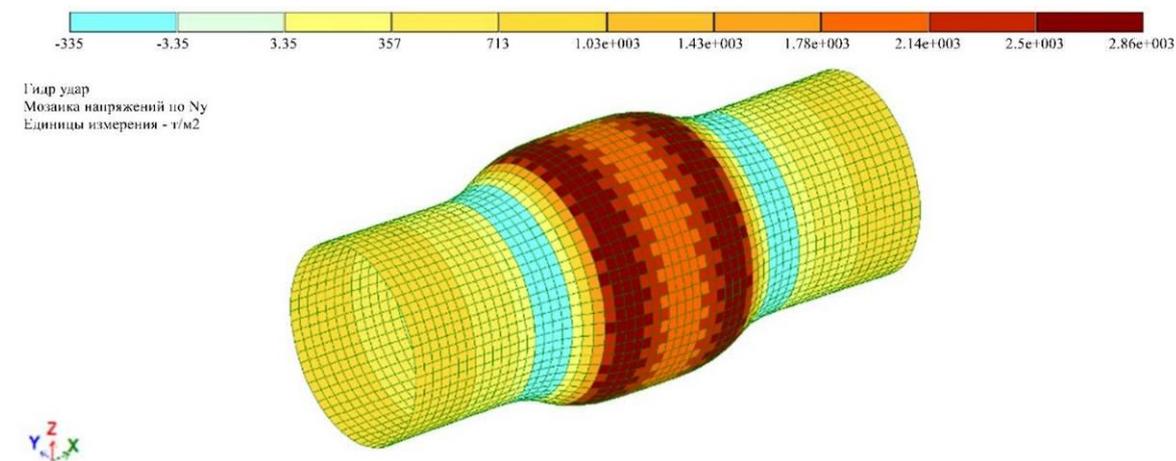


Рис. 10. – Усилия  $N_y$  в наружной стенке трехслойной трубы при распределенном импульсе

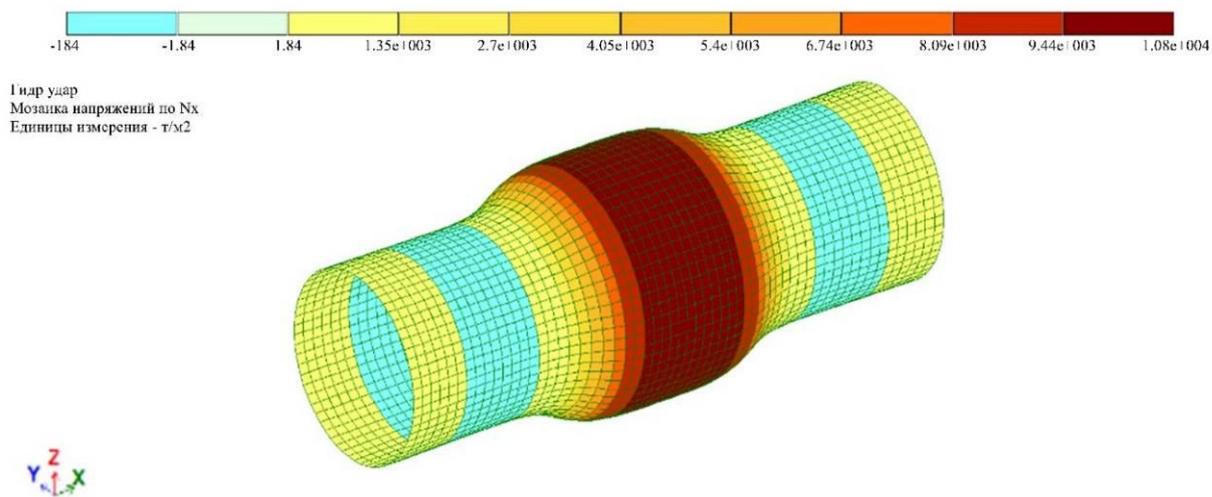


Рис. 11. – Усилия  $N_x$  во внутренней стенке трехслойной трубы при распределенном импульсе

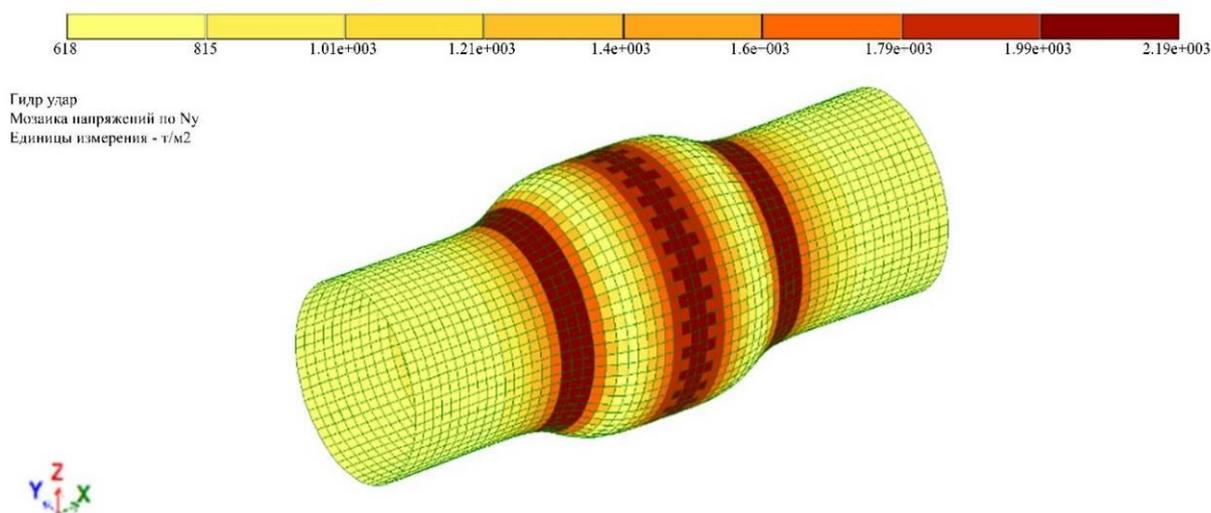


Рис. 12. – Усилия  $N_y$  во внутренней стенке трехслойной трубы при распределенном импульсе

Таблица № 1

Сравнение результатов расчета

№ п/п	Показатели	Сплошностенчатая труба	Трехслойная труба	
			распределенная нагрузка	
		распределённая нагрузка	наружный слой	внутренний слой
1	Перемещение Z, мм	±0,43	<b>±0,645</b>	<b>±0,651</b>
2	Напряжения $N_x$ , т/м <sup>2</sup>	<b>20400</b> -671	<b>9720</b> -408	<b>10800</b> -184
3	Напряжения $N_y$ , т/м <sup>2</sup>	1650	2860 -335	2190 618

Был проведен сравнительный анализ максимальных перемещений, продольных ( $N_x$ ) и кольцевых ( $N_y$ ) напряжений (см. таблицу № 1).

1. Проведенный анализ показал:

В случае импульсной нагрузки наибольшие перемещения обеспечиваются в слоях трехслойной конструкции и составляют 0,645 мм для наружного слоя и 0,651 мм для внутреннего слоя, что в 1,5 раза больше, чем в сплошностенчатой трубе (0,43 мм).

2. Анализ напряжений  $N_x$  свидетельствует о том, что при распределенной импульсной нагрузке растягивающие напряжения в

элементах стенки стальной трубы достигают значительной величины  $\sigma_+ = 20400 \text{ т/м}^2$ . Это незначительно меньше предела прочности стали  $R = 230 \text{ МПа} = 23445 \text{ т/м}^2$ . Усилия сжатия очень малы ( $\sigma_- = 671 \text{ т/м}^2$ ). В трехслойной трубе растягивающие напряжения в наружном и внутреннем слоях достигают критических значений  $\sigma_+ = 9720 \text{ т/м}^2$  и  $\sigma_+ = 10800 \text{ т/м}^2$ , соответственно. Это больше предела прочности алюминия  $R = 80 \text{ МПа} = 8155 \text{ т/м}^2$ . Здесь усилия сжатия также малы и составляют  $\sigma_- = 408 \text{ т/м}^2$  и  $\sigma_- = 184 \text{ т/м}^2$  соответственно.

### 3. Анализ напряжений $N_Y$ показал:

Под действием импульсной нагрузки кольцевые напряжения в элементах стенки стальной трубы достигают величины  $\sigma_+ = 1650 \text{ т/м}^2$ . Это значительно меньше предела прочности стали  $R = 23445 \text{ т/м}^2$ . Растягивающие кольцевые напряжения в наружном и внутреннем слоях достигают значений  $\sigma_+ = 2860 \text{ т/м}^2$  и  $\sigma_+ = 2190 \text{ т/м}^2$ , соответственно, что в 3-4 раза меньше предела прочности алюминия  $R = 8155 \text{ т/м}^2$ .

### 4. Диаметры труб в расчетах приняты одинаковыми.

На основании полученных результатов и проведенного анализа было установлено: при равномерно распределенной импульсной нагрузке на участке длиной в 1 метр в сплошностенчатой стальной трубе растягивающие напряжения достигают критических значений. В трехслойной трубе растягивающие напряжения в слоях трубы превышают предела прочности алюминия, т.е. имеет место разрушение конструкции. Потеря прочности слоев трехслойной трубы происходит, в основном, из-за недостаточной жёсткости сечения.

### 5. Из всего сказанного следует, что зоны максимальных напряжений и деформаций в трехслойной трубе расположены

непосредственно в зоне воздействия нагрузки. Другими словами, носят локализованный характер. В то же время в сплошностенчатой трубе зоны максимальных напряжений и деформаций практически распределены по всей длине рассматриваемого образца, т.е. носят глобальный характер.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод: трехслойная труба из алюминия более надежна при воздействии импульсных нагрузок, чем сплошностенчатая стальная труба.

### Литература

1. Камерштейн А. Г., Рождественский В. В., Ручимский М. Н. Расчет трубопроводов на прочность. Москва 1963. 442 С.
2. Устарханов О.М., Булгаков А.И., Гаджиев М.Д. Совершенствование моделей расчета трехслойных конструкций // Тезисы докладов XXII научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ. Махачкала, 1999. С.52-54.
3. Айнбиндер А. Б., Камерштейн А. Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. Справочное пособие. М.: Недра, 1982. 341 С.
4. Березина И. В., Самойлов Б. В. Особенности расчета профиля магистрального трубопровода большого диаметра. Транс- 176 порт и хранение нефти и нефтепродуктов, 1976, JS 10, с. 15-17.
5. Бородавкин П. П., Синюков А. М. Прочность магистральных трубопроводов. М.: Недра, 1984 г. - 245 С.
6. Кобелев В. Н., Коварский Л. М., Тимофеев С. И. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение, 1984 г. 304 С.
7. Штамм К., Витте Г. Многослойные конструкции: пер. с нем. М.: Стройиздат, 1983. 300 с.

8. Хэбип Л.М. Обзор современного состояния исследований по трехслойным конструкциям. // Механика. Периодич. сб. переводов иностранных статей. -1996. Т.96, №2. - С. 119-130.
  9. Булгаков А.И., Вишталов Р.И., Муселемов Х.М., Устарханов О.М. Расчет трехслойных труб большого диаметра на ПК «Лири» // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2018; 45 (2). URL: 10.21822/2073-6185-2018-45-2-191-199
  10. Александров А. Я. Куршин Л. М. Трехслойные пластинки и оболочки. – В– кн.: Прочность, устойчивость, колебания. М.: Машиностроение, 1968, т.2. с 243-267.
  11. Пелех Б.Л., Лазько В.А. Слоистые анизотропные пластины и оболочки с концентраторами напряжений. Киев: Наук. Думка, 1982. 295 с.
  12. Агапов В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике, и устойчивости пространственных тонкостенных подкреплённых конструкций. Учебное пособие М.: Изд АСВ, 2000, 152 с.
  13. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: 1984г, 424 с.
  14. Рикардс Р. Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин. Рига: Зинатне, 1988, 284 с.
  15. Розин Л.А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам. М.: Стройиздат, 1977, 132 с.
  16. Сборник задач по гидравлике, под ред. В. А. Большакова. Киев: Вища школа, 1979. 336 с.
  17. Стренг Г., Фикс Д. Теория метода конечных элементов. М.: 1977, 350 с.
  18. Городецкий А. С., Евзеров И. Д. Компьютерные модели конструкций. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов. 2009г, 360 с.
-

19. Устарханов О.М., Булгаков А.И., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О. Расчёт трехслойных балок с учетом клеевого шва по методу конечных элементов с помощью ПК ЛИРА // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2012.— №5.— с. 72-75.
20. Сабоннадьер Ж.К., Кулон Ж.Л. Метод конечных элементов и САПР. М.: Мир, 1989, 190 с.
21. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Промышленные деформируемые, спеченные и литейные алюминиевые сплавы. Справочное руководство. - Москва: Металлургия, 1972. - 551 с.
22. Квасов Ф.И., Фридляндер И.Н. Промышленные алюминиевые сплавы. М.: Металлургия, 1984 г. 528 с.
23. Yakovlev Y. A., Belyaev A. K., Loginov V. P., Polyanskiy V.A., Arseniev D.G., Polyanskiy A.M. Hydrogen Diagnostics of Industrial Parts of Aluminum Alloys // Advanced Structured Materials. – 2021. – Vol. 143. – P. 195-213. – DOI: 10.1007/978-3-030-66948-5\_13.
24. Valikhov V., Kahidze N., Khrustalyov A., Zhukov I., Vorozhtsov A. Investigation of structure, mechanical properties and crystallization of aluminum alloys containing aluminum oxide nanoparticles // MATEC Web of Conferences: 14th International Workshop on High Energy and Special Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application, HEMs 2018, Tomsk, 03–05 сентября 2018 года. Vol. 243. – Tomsk: EDP Sciences, 2018. – P. 00022.

### References

1. Kamershteyn A. G., Rozhdestvenskiy V. V., Ruchimskiy M. N. Raschet truboprovodov na prochnost' [Calculation of pipelines for strength]. Moskva 1963. 442 p.
  2. Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Gadzhiev M.D. Tezisy докладов XXII nauchno-tekhnicheskoy konferentsii prepodavateley, sotrudnikov, aspirantov i studentov DGTU. Makhachkala, 1999. pp.52-54.
-

3. Aynbinder A. B., Kamershteyn A. G. Raschet magistral'nykh truboprovodov na prochnost' i ustoychivost' [Calculation of trunk pipelines for strength and stability]. Spravochnoe posobie. M.: Nedra, 1982. 341 p.
  4. Berezina I. V., Samoylov B. V. Trans 176 port i khranenie nefi i nefteproduktov, 1976, JS 10, pp. 15-17.
  5. Borodavkin P. P., Sinyukov A. M. Prochnost' magistral'nykh truboprovodov [Strength of main pipelines]. M.: Nedra, 1984. 245 p.
  6. Kobelev V. N., Kovarskiy L. M., Timofeev S. I. Raschet trekhsloynnykh konstruktsiy [Calculation of three-layer structures]. M.: Mashinostroenie, 1984. 304 p.
  7. Shtamm K., Vitte G. Mnogosloynnye konstruktsii [Multilayer structures]: per. s nem. M.: Stroyizdat, 1983. 300p.
  8. Khebpil J.I.M. Mekhanika. Periodich. sb. perevodov inostrannykh statey. 1996. T.96, №2. pp. 119-130.
  9. Bulgakov A.I., Vishtalov R.I., Muselemov Kh.M, Ustarkhanov O.M. Vestnik DGTU. Tekhnicheskie nauki. Tom 45, №2, 2018. pp/ 191-199.
  10. Aleksandrov A. Ya. Kurshin L. M. Trekhsloynnye plastinki i obolochki. V kn.: Prochnost', ustoychivost', kolebaniya. M.: Mashinostroenie, 1968, t.2. pp. 243-267.
  11. Pelekh B.L., Laz'ko V.A. Sloistye anizotropnye plastiny i obolochki s kontsentratsiyami napryazheniy [Layered anisotropic plates and shells with stress concentrators]. Kiev: Nauk. Dumka, 1982. 295 p.
  12. Agapov V. P. Metod konechnykh elementov v statike, dinamike, i ustoychivosti prostranstvennykh tonkostennykh podkreplennykh konstruktsiy [Finite element method in statics, dynamics, and stability of spatial thin-walled reinforced structures]. Uchebnoe posobie M.: Izd ASV, 2000, 152 p.
  13. Gallager R. Metod konechnykh elementov [Finite element method]. M.: 1984g, 424 p.
-

14. Rikards R. B. Metod konechnykh elementov v teorii obolochek i plastin [The finite element method in the theory of shells and plates]. Riga: Zinatne, 1988, 284 p.
  15. Rozin L.A. Metod konechnykh elementov v primenenii k uprugim sistemam [The finite element method in application to elastic systems]. M.: Stroyizdat, 1977, 132p.
  16. Sbornik zadach po gidravlike [Collection of problems on hydraulics], pod red. V. A. Bol'shakova. Kiev: Vishcha shkola, 1979. 336 p.
  17. Strenг G., Fiks D. Teoriya metoda konechnykh elementov [Theory of the finite element method]. M.: 1977, 350 p.
  18. Gorodetskiy A. S., Evzerov I. D. Komp'yuternye modeli konstruktsiy [Computer models of structures]. M.: Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov. 2009g, 360 p.
  19. Ustarkhanov O.M., Bulgakov A.I., Muselemov Kh.M., Ustarkhanov T.O. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tehnicheskie nauki. 2012. №5. pp. 72-75.
  20. Sabonnad'er Zh.K., Kulon Zh.L. Metod konechnykh elementov i SAPR [Finite element method and CAD]. M.: Mir, 1989, 190 p.
  21. Kvasov F.I., Fridlyander I.N. Promyshlennye deformiruemye, spechennye i liteynye alyuminievye splavy [Industrial Deformable, sintered and cast aluminum alloys]. Spravochnoe rukovodstvo. Moskva: Metallurgija, 1972. 551 P.
  22. Kvasov F.I., Fridlyander I.N. Promyshlennye alyuminievye splavy [Industrial Aluminum Alloys]. M.: Metallurgiya, 1984 g. 528 p.
  23. Yakovlev Y. A., Belyaev A. K., Loginov V. P., Polyanskiy V.A., Arseniev D.G., Polyanskiy A.M. Hydrogen Diagnostics of Industrial Parts of Aluminum Alloys. Advanced Structured Materials. 2021. Vol. 143. pp. 195-213. DOI: 10.1007/978-3-030-66948-5\_13.
-



24. Valikhov V., Kahidze N., Khrustalyov A., Zhukov I., Vorozhtsov A. Investigation of structure, mechanical properties and crystallization of aluminum alloys containing aluminum oxide nanoparticles. MATEC Web of Conferences: 14th International Workshop on High Energy and Special Materials: Demilitarization, Antiterrorism and Civil Application, HEMs 2018, Tomsk, 03–05 сентября 2018 года. Vol. 243. Tomsk: EDP Sciences, 2018. P. 00022.