

Влияние количества поочередно нанесенных слоев на динамические свойства стеклокомпозитных труб

Т.А. Мацевич^{1,2}, С.В. Шашкин^{1,2}, В.А. Антошин³, А.Ю. Албагачиев³

¹Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Москва

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва

³Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва

Аннотация: Исследование влияния количества слоев стеклокомпозитной трубы на динамические нагружения, в том числе, при эксплуатации в сейсмически активных областях, обусловлено соблюдением требований новейших документов в области строительного нормоконтроля. Механические характеристики стеклокомпозитной трубы зависят от упруго-прочностных свойств стекловолокна, кварцевого песка и связующего, их соотношения и прочности сцепления между слоями. Ключевым параметром соответствия стеклокомпозитной трубы заданным требованиям является кольцевая жесткость. Прочность композитного материала определяется с помощью правила смесей. Определены свойства стеклокомпозитной трубы с помощью правила смесей. Рассмотрено влияние количества слоев стеклокомпозитной трубы на ее упруго-прочностные свойства. В программном комплексе Midas GTS NX промоделирован эксперимент с одноосным сжатием звена трубы. Определена максимальная нагрузка, при которой образец достигает 5% деформации. По результатам исследования получено, что лучшими упруго-прочностными и эксплуатационными свойствами обладает трехслойная композитная конструкция.

Ключевые слова: Стеклокомпозитная труба, схема слоев, сейсмостойкость, метод непрерывной намотки, упруго-прочностные свойства.

Достаточно остро стоит вопрос исполнения требований новейшей строительной и нормативной документации в области сейсмостойкости. При расчетах композитных материалов необходимо учитывать компонентность материала, а также взаимосвязь между слоями, что приводит к необходимости исследования влияния количества слоев в стеклокомпозитной трубе.

Механические характеристики стеклокомпозитной трубы зависят от упруго-прочностных свойств стекловолокна, кварцевого песка и связующего, их соотношения и прочности сцепления между слоями. Ключевым показателем соответствия трубы заданным требованиям является кольцевая

жёсткость трубы, определяющая внешние нагрузки от грунта, строительной техники и других факторов (выражается в Н/м²) [1].

В [2] было показано, что кольцевая жесткость, которая достигается при изготовлении стеклопластиковой емкости методом непрерывной намотки, достаточна для противодействия возникающим вертикальным нагрузкам от грунта засыпки с учетом запаса прочности на 50 лет эксплуатации.

Также важными факторами являются пропорции смолы, песка и армирующего стекловолокна, влияющие на упруго-прочностные характеристики, соотношение рубленого и намоточного армирующего стекловолокна, а также геометрические размеры, взаимодействие волокна и связующего, напряжённость компонентов, дефекты композита и экзотермические реакции при полимеризации.

Деформационные свойства стеклокомпозитных труб напрямую отвечают закону Гука. Однако, когда удлинение матрицы меньше удлинения волокна, прочность в стеклокомпозите не может быть достигнута на все 100 % [3-4]. Если деформационные свойства трубы соответствуют закону Гука, то предел прочности некоторых типов волокон превосходит прочность изотропного полимера из существующих в настоящее время [5-8].

Прочность композитного материала стеклокомпозитной стенки трубы определяется правилом смеси с учетом коэффициента реализации механических характеристик по формуле:

$$F_k = (F_n V_n + F_p V_p + F_{п} V_{п}) \cdot K_{рм}$$

где, F_k – физико-механические характеристики стенки стеклокомпозита.

V_n , V_p , $V_{п}$ - объемное содержание: непрерывного волокна, рубленного волокна и кварцевого песка, соответственно;

F_n , F_p , $F_{п}$ - физико-механические характеристики компонента

стенки: непрерывного волокна, рубленного волокна и кварцевого песка, соответственно;

K_{pm} - коэффициента реализации механических характеристик.

Введение коэффициента реализации прочности K_{σ} и модуля упругости K_E волокон позволяет оценивать влияние отдельных факторов на реализацию в композите средних значений этих показателей. Для высоконаполненных систем с параллельным расположением волокон коэффициенты реализации могут быть определены с достаточной для инженерных расчетов точностью по формулам [9]:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_k}{V_B \cdot \sigma_B}$$

$$K_E = \frac{E_k}{V_B \cdot E_B}$$

где, V_B - объемное содержание волокон;

σ_k, E_k - предел прочности и модуль упругости композита;

E_B - модуль упругости волокна;

Коэффициенты реализации предела прочности и модуля упругости можно также выразить в виде произведения коэффициентов, учитывающих влияние каждого фактора по формулам [9]:

$$K_{\sigma} = k_m \cdot k_{v\sigma} \cdot k_{vE} \cdot k_l \cdot k_{\varphi} \cdot k_k,$$

$$K_E = k_m \cdot k_l \cdot k_{\varphi} \cdot k_k \cdot k_{vE}$$

где, $k_m, k_{v\sigma}, k_{vE}, k_l, k_{\varphi}, k_k$ - коэффициенты, учитывающие влияние на степень реализации средних значений предела прочности и модуля упругости волокон таких факторов, как взаимное влияние компонентов, дисперсия прочности и модуля упругости, дискретность и разориентация, пористость матрицы, соответственно.

Свойства композитов прежде всего определяются свойствами и количественным соотношением исходных компонентов, а также взаимодействием их на границе раздела и свойствами межфазных слоев [10,11]. При этом, чем выше дисперсность, меньше плотность, тем меньше должно быть содержание наполнителей. Для расчета предельной степени наполнения частицами, близкими по форме к шарообразным, для центрального слоя (сердцевины стенки трубы) предлагается следующая формула:

$$V_{\pi} \leq \frac{\pi\sqrt{2}}{6} \left(\frac{d}{d+2\delta} \right)^3$$

где, V_{π} – объемная доля кварцевого песка;

d – размер (диаметр частицы наполнителя);

δ – толщина слоя полимера, необходимая для сплошного обволакивания частицы наполнителя.

Средний размер частиц песка взят 0,3 мм.

Для расчета модуля упругости дисперсно-наполненных полимеров принимают обобщенное уравнение Нилсена-Кернера:

$$\frac{E_{KM}}{E_M} = \frac{1 + AB \cdot \varphi_H}{1 - B \cdot \psi \cdot \varphi_H}$$

или

$$E_{KM} = \frac{1 + AB \cdot \varphi_H}{1 - B \cdot \psi \cdot \varphi_H} \cdot E_M$$

где, $A = \frac{7 - 5\nu_M}{8 - 10\nu_M}$; $B = \frac{E_H / E_M - 1}{E_H / E_M + A}$; $\psi = 1 + \left(1 - \frac{\varphi_{\max}}{\varphi_{\max}^2} \right)$

E_{KM} , E_M и E_H - модули упругости композитного материала, матрицы и наполнителя, соответственно;

ν_M - коэффициент Пуассона матрицы;

φ_n и φ_{\max} - объемная и максимальная объемная доли наполнителя, соответственно.

Прочность при растяжении будет примерно равна прочности матрицы. По результатам проведенных расчетов составлена таблица 1 с физико-механическими свойствами полиэфира, армированного кварцевым песком, из расчета максимально возможной объемной доли песка в матрице.

Таблица 1 – Физико-механические свойства полиэфира, армированного кварцевым песком.

Объемная доля песка, V_p	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона	Модуль сдвига, МПа	Плотность, $кг/м^3$
0,61	6962,76	0,27	2733,01	2101,30

С целью придания трубе коррозионной стойкости и снижения гигроскопичности материала также необходимы барьерные внутренний и наружные слои в виде поверхностного покрытия из тонкого слоя полиэфирного связующего, армированного С-стеклом плотностью 30 г/м^2 . Влияние поверхностных барьерных слоев связующего толщиной от 0,3 до 1,0 мм на упруго-прочностные свойства трубы не будет являться существенным, однако позволит увеличить срок службы за счет снижения влияния контактирующих со стеклокомпозитным материалом сред [12, 13].

Исследования [14-16] показывают, что оптимальным решением является расположение матрицы с дисперсным наполнителем между слоями матрицы с армирующими волокнами [17]. Но влияние количества разных слоев в стенке трубы на эксплуатационные и упруго-прочностные свойства не рассмотрено.

Для исследования влияния количества поочередно нанесенных слоев на эксплуатационные и упруго-прочностные свойства сравним трубы с тремя и пятью слоями. Принята следующая схема слоев:

- 3 слоя:

- 1) Матрица/стекловолокно,
- 2) Матрица/ кварцевый песок,
- 3) Матрица/стекловолокно;

- 5 слоев:

- 1) Матрица/стекловолокно,
- 2) Матрица/ кварцевый песок,
- 3) Матрица/стекловолокно,
- 4) Матрица/ кварцевый,
- 5) Матрица/стекловолокно.

Исследование проводилось методом математического моделирования в специализированном расчетном комплексе Midas GTS NX. Целью моделирования было воссоздание эксперимента по одноосному сжатию образца трубы.

Моделировалась стеклокомпозитная труба. Общий вид модели стеклокомпозитной трубы представлен на Рисунке 1. Длина модели составляет 1 м.

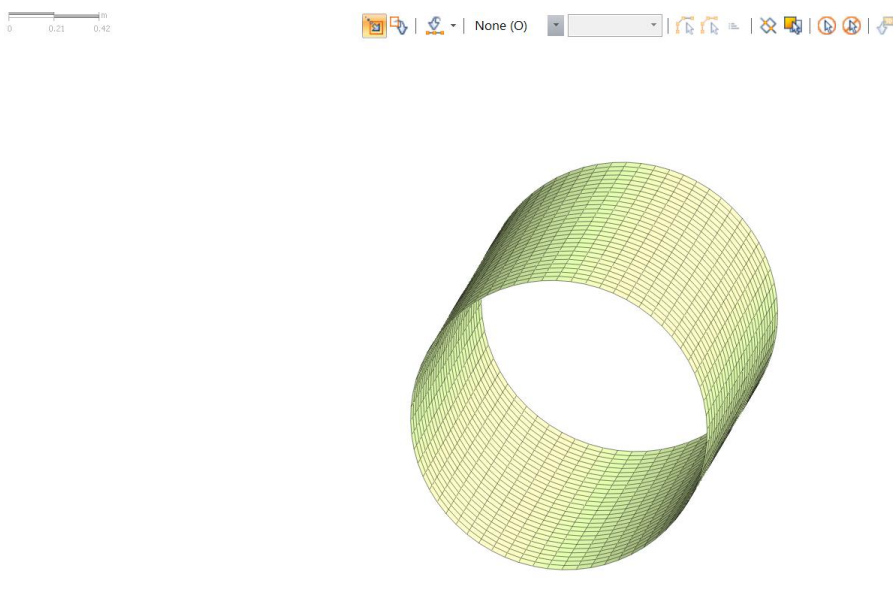


Рисунок 1. Общий вид модели стеклокомпозитной трубы

На рисунках 2 и 3 представлены модели стеклопластика, замоделированного, как слоистый материал для трехслойной и пятислойной стеклокомпозитных труб.

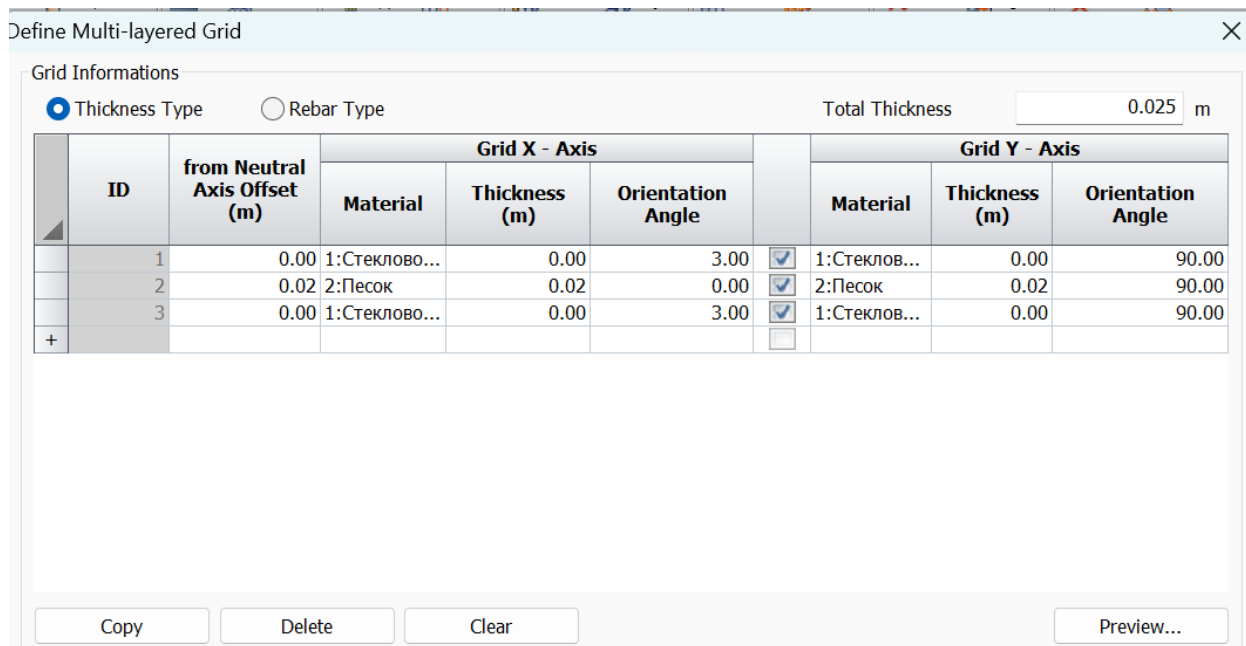


Рисунок 2. Модель для трехслойной трубы

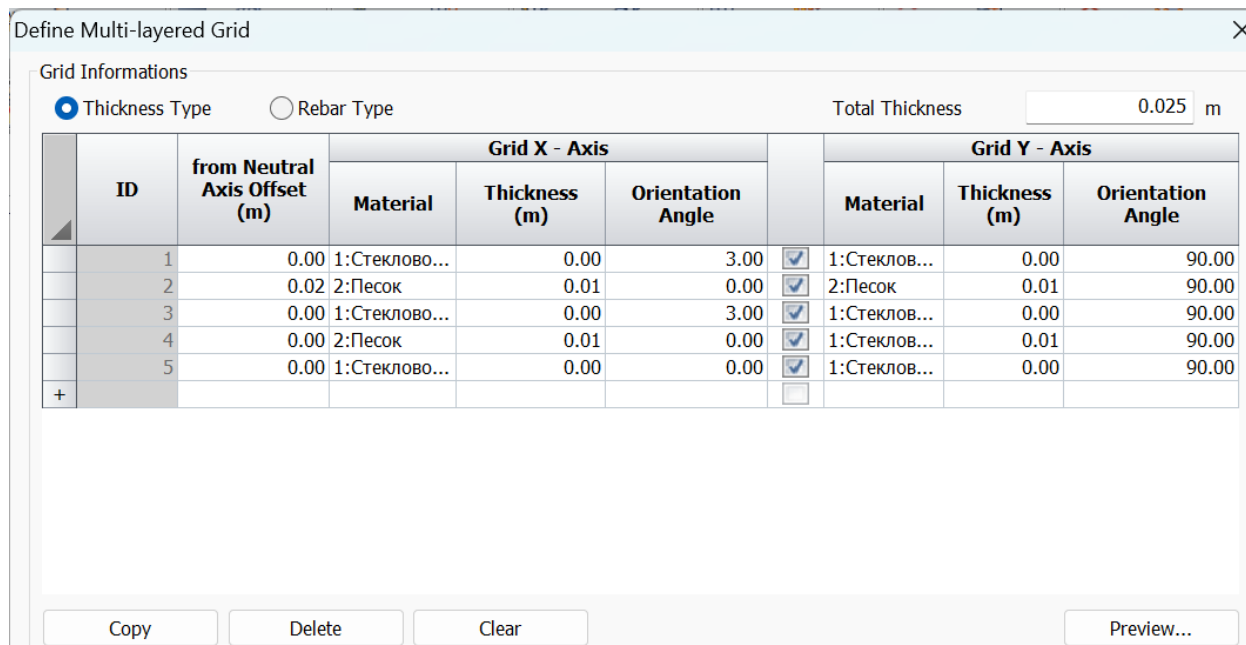


Рисунок 3. Модель для пятислойной трубы

Для воссоздания эксперимента у модели были ограничены перемещения. Закрепление модели изображено на рисунке 4.

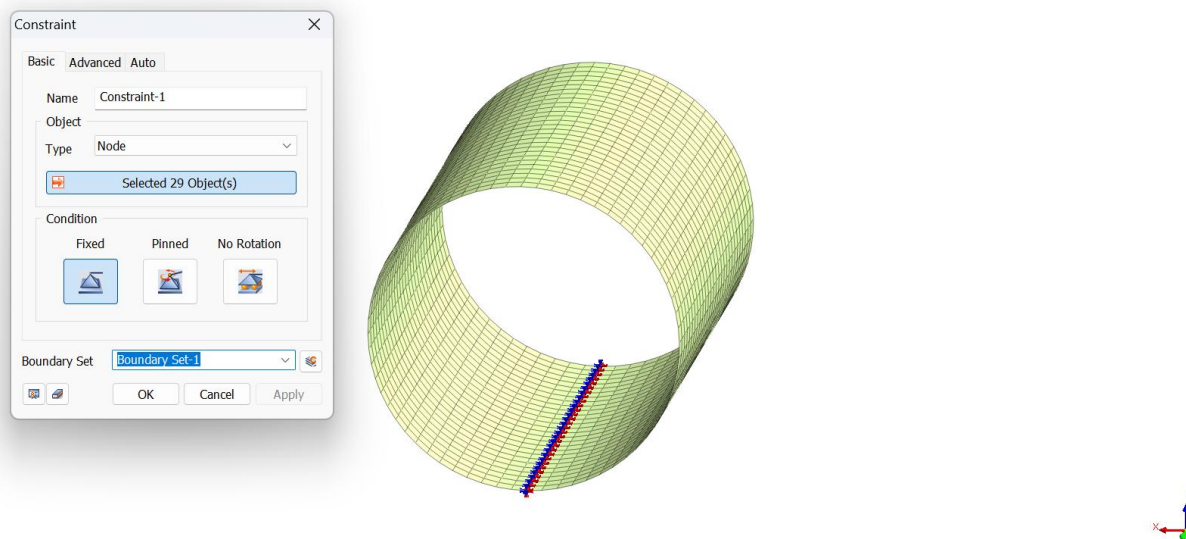


Рисунок 4. Закрепление модели

Значение нагрузки подбиралось, исходя из достижения деформации равной 5% (общепринятая государственными нормативами предельная деформация для стеклокомпозитных труб). Нагрузка принята равной 14 кН/м (рисунок 5).

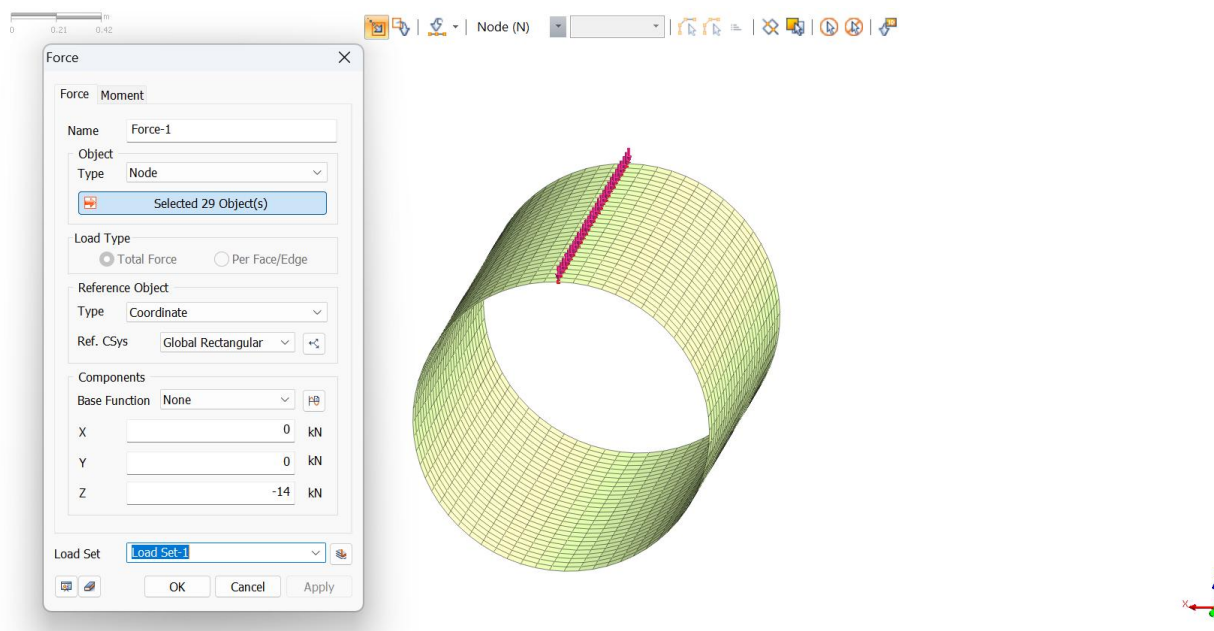


Рисунок 5. Нагрузка на звено трубы

В результате оценивались возникающие в звене трубы напряжения.

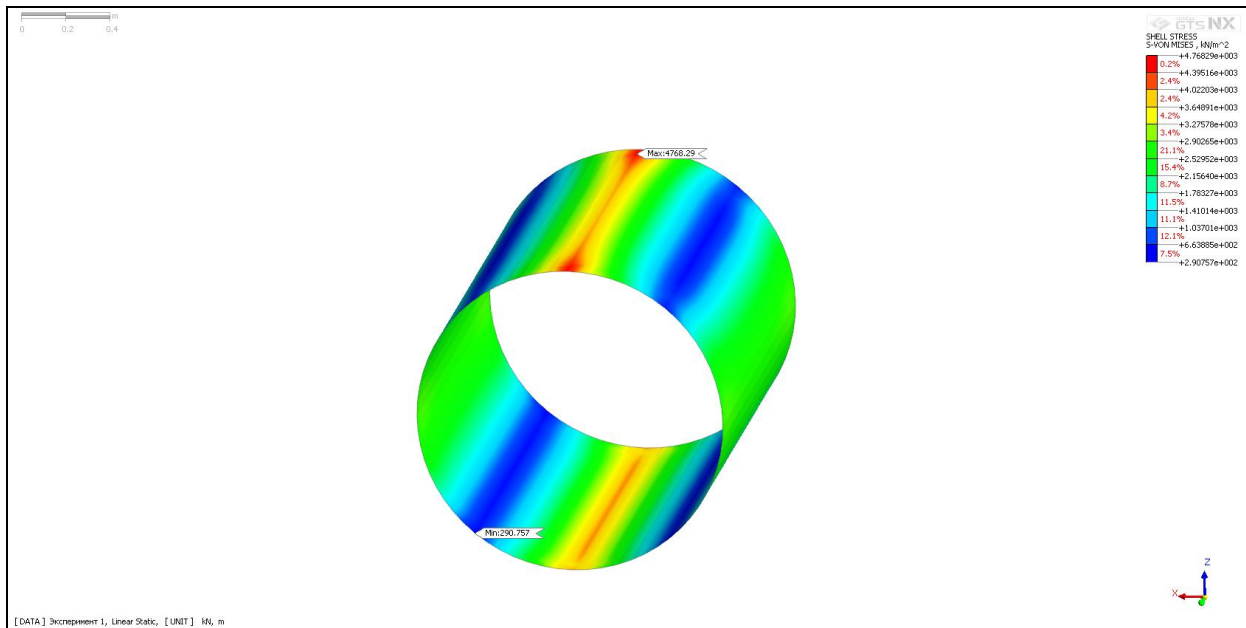


Рисунок 6. Максимальные напряжения звена трехслойной трубы
Максимальные напряжения, возникающие в стенке звена трехслойной трубы, составляют 4.77 Мпа (рисунок 6).

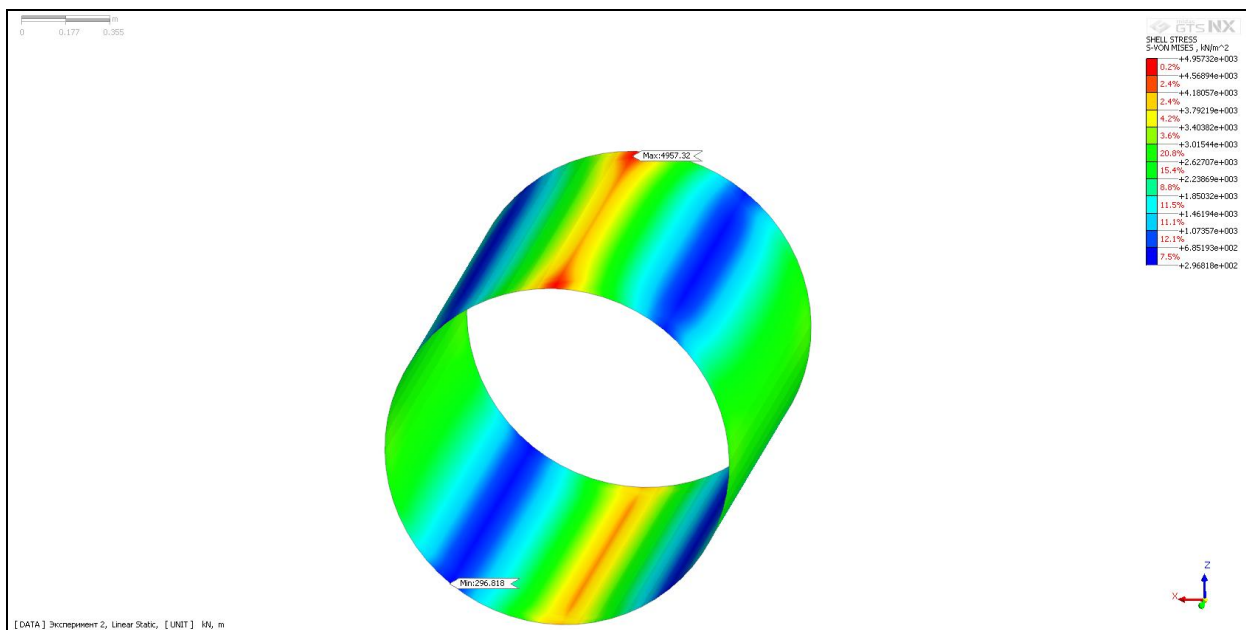


Рисунок 7. Максимальные напряжения звена пятислойной трубы
Максимальные напряжения, возникающие в стенке звена пятислойной трубы, составляют 4.95 Мпа (рисунок 7).

При одинаковых нагрузках, в звене трехслойной трубы возникают напряжения меньшие, чем в пятислойной.

Исходя из полученных данных, лучшими упруго-прочностными и эксплуатационными свойствами будет обладать трехслойная конструкция. Данная конструкция, являясь наиболее перспективным и оптимальным вариантом стенки трубы, позволит распределять внешние и внутренние нагрузки без разрушения среднего слоя с кварцевым песком и соответствовать новейшим требованиям в области сейсмостойкости.

Работа (МТА, ШСВ) выполнена за счет гранта РФФ № 24-49-02002.

Литература

1. Юченко Л.В., Вайнберг М.В., Чураев А.А., Использование стеклопластиковых труб в сельскохозяйственном водоснабжении // Экология и водное хозяйство. 2019. №3. с. 35-39.
2. Шашкин С.В., Мацевич Т.А., Антошин В.А., Албагачиев А.Ю. Применимость методов изготовления стеклопластика при строительстве горизонтальных емкостей //Инженерный вестник Дона. 2023. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8501.
3. Li Hong (Ed.) Fiberglass Science and Technology: Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability. – Springer, 2021. p.555
4. Melnikov D.A., Ivanov S.V., Antoshin V.A. Glass-composite pipes and products from them: a given combination of operational and technological properties // Best available technologies for water supply and sanitation. - 2020. - No. 6. – pp. 22-23
5. Björklund, I. Plastic pipes, their characteristics, and applications. - М.: NPG, 2000. - 116 p.

6. Lopatina A.A., Sazonova S.A. Analysis of pipe laying technologies // Bulletin of PNRPU. Construction and architecture T. 7. 2016.- No. 1.- pp. 93–111

7. Плевков В.С., Тамразян А.Г., Кудряков К.Л. Прочность и трещиностойкость изгибаемых фибробетонных элементов с преднапряженной стеклокомпозитной арматурой при статическом и кратковременном динамическом нагружении: монография. Томск: Изд-во Том.гос. архит.-строит.ун-та, 2021. - 204 с.

8. Туктарова, Ю. ATTSIELD C105 - современное решение для производства стеклопластика // Композитный мир. – 2018. – № 5(80). – С. 44-47. – EDN YLTJYL.

9. Гуняев Г.М. Структура и свойства полимерных волокнистых композитов. - М.: Химия, 1981. - 62 с.

10. Аскадский А.А., Мацеевич Т.А., Попова М.Н., Кондращенко В.И. Прогнозирование совместимости полимеров, анализ состава микрофаз и ряда свойств смесей // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2015. Т. 57. № 2. С. 162.

11. Аскадский А.А., Мацеевич Т.А., Попова М.Н., Казанцева В.В., Афанасьев Е.С., Коврига О.В., Кондращенко В.И. Влияние фазового состояния и размера дисперсных частиц на модуль упругости композитов на основе смесей полимеров // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 2015. Т. 57. № 5. с. 448.

12. Антошин В.А., Мельников Д.А., Иванов С.В., Албагачиев А.Ю. Определение долговременных прочностных свойств стеклопластиковых труб для расчета срока эксплуатации. // Фундаментальные исследования и инновационные технологии в машиностроении. Научные труды VII Международной научной конференции. 2021. с. 31-33.

13. Шершак П.В. Особенности национальной стандартизации методов испытаний полимерных композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2019. №2 (74). с. 57-68.
14. Мельников Д.А., Ильичев А.В., Вавилова М.И. Сравнение стандартов для проведения механических испытаний стеклопластиков на сжатие// Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн., 2017. №3. с. 6. URL: viam-works.ru (дата обращения 28.03.2021).
15. Шамбина С.Л. Анизотропные композитные материалы и особенности расчета конструкций из них // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2005. №1.с. 21-27.
16. Воронцов Г.В., Евтушенко С.И. Математическая модель стеклопластиковых изделий, получаемых методом продольно-поперечной намотки // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2009. №3. с. 33-41.
17. Холодников Ю.В. Новые способы изготовления полимерных композитов // Sciences of Europe. 2016. №1-1. с. 47-54.

References

1. Yuchenko L.V., Vaynberg M.V., Churayev A.A., Ekologiya i vodnoye khozyaystvo. 2019. №3. pp. 35-39.
 2. Shashkin S.V., Matseevich T.A., Antoshin V.A., Albagachiyev A.YU. Inzhenernyj vestnik Dona. 2023. № 5. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2023/8501.
 3. Li Hong (Ed.) Fiberglass Science and Technology: Chemistry, Characterization, Processing, Modeling, Application, and Sustainability. Springer, 2021. p.555.
 4. Melnikov D.A., Ivanov S.V., Antoshin V.A. Glass-composite pipes and products from them: a given combination of operational and technological
-

properties. Best available technologies for water supply and sanitation. 2020. No. 6. pp. 22-23.

5. Björklund, I. Plastic pipes, their characteristics, and applications. M.: NPG, 2000. 116 p.

6. Lopatina A.A., Sazonova S.A. Analysis of pipe laying technologies. Bulletin of PNRPU. Construction and architecture T. 7. 2016. No. 1. pp. 93–111.

7. Plevkov V.S., Tamrazyan A.G., Kudyakov K.L. Prochnost' i treshchinostojkost' izgibaemyh fibrobetonnyh elementov s prednapryazhennoj steklokompozitnoj armaturoj pri staticheskom i kratkovremennom dinamicheskom nagruzenii [Strength and crack resistance of flexural fibre-concrete elements with prestressed glass composite reinforcement under static and short-term dynamic loading]. Monografiya. Tomsk: Izd-vo Tom.gos. arhit.-stroit.un-ta, 2021-204s.

8. Tuktarova, YU. ATTSHIELD C 105 -. YU. Tuktarova Kompozitnyy mir. 2018. № 5(80). p. 44-47. EDN YLTJYL.

9. Gunyayev G.M. Struktura i svoystva polimernykh voloknistykh kompozitov [Structure and properties of polymer fibre composites]. M.: Khimiya, 1981. 62 p.

10. Askadskii A.A., Matseevich T.A., Popova M.N., Kondrashchenko V.I. Polymer Science, Series A. 2015. V. 57. № 2. pp. 186-199.

11. Askadskii A.A., Matseevich T.A., Popova M.N., Kazantseva V.V., Afanasyev E.S., Kovriga O.V., Kondrashchenko V.I. Polymer Science, Series A. 2015. V. 57. № 5. pp. 596-612.

12. Antoshin V.A., Mel'nikov D.A., Ivanov S.V., Albagachiyev A.YU. Nauchn·yye trudy VII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. 2021. pp. 31-33.

13. Shershak P.V. Trudy VIAM. 2019. №2 (74). pp. 57-68.

14. Mel'nikov D.A., Il'ichev A.V., Vavilova M.I. Trudy VIAM: elektron. nauch.-tekhnich. zhurn., 2017. №3. S. 6. URL: viam-works.ru (date assessed 28.03.2021).



15. Shambina S.L. Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2005. №1. pp. 21-27.
16. Vorontsov G.V., Yevtushenko S.I. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. 2009. №3. pp. 33-41.
17. Kholodnikov YU.V. Sciences of Europe. 2016. №1-1. pp. 47-54.

Дата поступления: 18.06.2024

Дата публикации: 27.07.2024