

**ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ**

УДК 681.586.5:622.692.4

**МОНИТОРИНГ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО
СОСТОЯНИЯ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ ТРУБЫ ПРИ
НАГРУЖЕНИИ ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ¹**

© 2026 г. Г. С. Шипунов*, Н. В. Попов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Россия, 614000, Пермь, Комсомольский проспект, 29

**E-mail: gsshipunov@yandex.ru*

Поступила в редакцию 19.05.2026

После доработки 03.06.2026

Принята к публикации 06.07.2026

Представлены результаты экспериментального исследования трубной конструкции из стеклопластика, оснащенной интеллектуальными слоями с волоконно-оптическими датчиками на основе волоконных брэгговских решеток. Цель исследования заключалась в оценке применимости данных датчиков для контроля внутреннего давления (в диапазоне 5–25 бар) и локации области разрушения конструкции. В ходе нагружения образца вплоть до физического разрушения установлена линейная зависимость между деформациями и давлением, сохраняющаяся при значениях, существенно превышающих ранее исследованный порог 9 бар. Экспериментально подтверждена способность системы точно определять координаты зоны катастрофического отказа по аномалиям спектрального отклика. Полученные результаты обосновывают использование волоконно-оптических систем структурного мониторинга для повышения промышленной безопасности нефтегазовых объектов и предотвращения техногенных аварий.

Ключевые слова: волоконно-оптические датчики, стеклопластиковая труба, контроль внутреннего давления трубы, напряженно-деформированное состояние, полимерные композиционные материалы, смарт-слой, волоконные брэгговские решетки, разрушение трубных конструкций, ступенчатое нагружение, линейная зависимость внутреннего давления.

¹ Международная конференция “Оптическая рефлектометрия, метрология и сенсорика 2026”, Россия, Пермь, 26–28 мая 2026 г.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время безопасности эксплуатации трубных конструкций нефтегазовой отрасли уделено особое внимание, поскольку их преждевременный выход из строя влечет за собой колоссальные финансовые потери за счет полной остановки транспортировки нефти и локализации области поломки, что является трудоемким процессом в силу большой протяженности трубопроводов [1, 2]. В то же время прорыв трубной конструкции приводит к утечке нефтепродуктов и, как следствие, к загрязнению окружающей среды [3, 4]. Кроме того, следует отметить, что плановый осмотр недеформированной конструкции методами неразрушающего контроля, в свою очередь, приводит к остановке транспортировки нефтепродуктов и потере финансов и времени на проведение диагностики всего протяженного трубопровода [5].

Для предотвращения описанных выше проблем различные авторы начали исследовать применимость для нефтегазовой отрасли так называемых систем мониторинга состояния конструкции на основе волоконно-оптических, пьезоэлектрических или тензометрических датчиков, которые позволяют в режиме реального времени проводить диагностику различных параметров [6–8]. Системы мониторинга состояния конструкций хорошо себя зарекомендовали при проведении диагностики напряженно-деформированного состояния мостовых сооружений, туннелей, рельсов и высоконагруженных авиационных деталей. Однако вопрос об эффективности применения таких систем мониторинга в нефтегазовой отрасли остается открытым, поскольку отсутствуют данные о возможности регистрации такими датчиками внутреннего давления и локализации появления трещин по всей длине трубопровода [9–11].

Из анализа зарубежной литературы установлено, что наиболее пригодными для мониторинга трубных конструкций являются распределенные и квазираспределенные волоконно-оптические датчики (ВОД) [12–14] за счет ряда их преимуществ: малых габаритных размеров, возможности объединения в единую сеть, высокой чувствительности, а также возможности передавать данные на большие расстояния без потери данных во времени [15–18].

В ряде работ описана применимость ВОД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР) для исследования внутреннего и внешнего давлений в различных трубопроводах. В работе [19] использовалась сеть ВОД, приклеенных на эластомерную втулку для

обеспечения совместности деформаций. Авторы работы [20] исследовали изменение температуры, расход и давление в трубе при помощи ВОД. Внедрение ВБР в трубу из стеклопластика на этапе изготовления описано в работе [21]. Созданию и исследованию эффективности применения различных защитно-позиционных слоев для волоконно-оптических линий посвящены работы [22–25].

На основании литературного обзора можно сделать вывод о том, что применимость ВОД в конструкциях нефтегазовой отрасли является актуальной. Однако применимость ВОД исследована только при квазистатических испытаниях и при нагружении внутренним давлением до 9 бар. Как известно, некоторые трубные конструкции эксплуатируются под давлением более 9 бар, а применимость ВОД для таких труб не изучена. Кроме того, открытым остается вопрос регистрации момента критической нагрузки, после которой происходят разрушение трубы в области ее локализации и утечка нефтепродуктов.

Таким образом, целью данной работы является оценка применимости ВОД на основе решеток Брэгга для контроля внутреннего давления и локализации области разрушения трубной конструкции.

2. ПРЕДМЕТ, ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбрана стеклопластиковая труба со схемой армирования [45/-45/0/45/-45/45/0/0], изготовленная методом мокрой намотки на внутренний герметизирующий слой из полиуретана в соответствии с ТУ 2296-002-26612968-2000. Геометрические характеристики трубы представлены в табл. 1.

Таблица 1. Геометрические характеристики трубы из стеклопластика

Характеристика	Размер, мм
Длина	710
Внешний диаметр	88.6
Внутренний диаметр с учетом герметизирующего слоя	75
Толщина стеклопластика	2.8
Толщина герметизирующего слоя	4

Перед проведением эксперимента труба помещалась в испытательную оснастку. Для проведения контроля внутреннего давления в процессе проведения испытаний на внешнюю поверхность трубы при помощи эпоксидной смолы (ТАФ) приклеивались смарт-слой с двумя ВБР (под номерами 101 и 102) вблизи заделки со стороны подачи воды, смарт-слой с одной ВБР (с номером 201) по центру трубы и смарт-слой с одной ВБР (с номером 301) вблизи заделки. Все волоконно-оптические линии приклеивались таким образом, чтобы датчики под номерами 101, 201 и 301 располагались на одной оси. ВБР с номерами 101 и 102 находились на расстоянии 80 мм друг от друга. Схема размещения датчиков на поверхности трубной конструкции представлена на рис. 1а. Смарт-слои использовались с целью защиты ВБР от механических воздействий и воздействий окружающей среды в процессе механических испытаний. Изготовление смарт-слоя и внедрение в него ВБР подробно описаны в работах [26–28]. Труба из стеклопластика со смонтированными смарт-слоями в испытательной оснастке представлена на рис. 1б.

Рис. 1. Схема размещения датчиков на поверхности стеклопластиковой трубы;

Далее испытательная оснастка подключалась к насосной пневмогидравлической станции ПГС 2-4п и проводилось нагружение внутренним давлением с целью выявления зависимости длины волны брэгговской решетки от значения внутреннего давления. Однако стоит отметить, что регулировка давления в пневмогидравлической станции ПГС 2-4п происходит аналоговым методом, вследствие чего набор и фиксация значения внутреннего давления происходят с некоторой погрешностью.

Нагружение стеклопластиковой трубы осуществлялось в несколько этапов. На первом этапе осуществлялось тестовое нагружение трубы внутренним давлением с целью наладки и настройки оборудования, далее прикладывалось давление от 5 бар (трубопроводное давление) до 25 бар с последующей разгрузкой до 5 бар с шагом 5 бар, и в заключение труба нагружалась аналогично предыдущему циклу нагружения, но без плавного сброса давления (рис. 2а). На втором этапе нагружение трубы осуществлялось давлением от 5 до 140 бар с последующей разгрузкой и дальнейшим нагружением до разрушения (рис. 2б). Схема нагружения представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема нагружения трубы из стеклопластика внутренним давлением ...

Подход к интерпретации результатов заключался в сравнении полученных от ВОД значений деформации с теоретической оценкой, рассчитанной в соответствии с уравнением [29]

$$\varepsilon = \frac{D}{2Eh} \left(1 - \frac{\nu}{2} \right) p, \quad (1)$$

где ε – деформации трубы, D – внутренний диаметры, E – модуль упругости, h – толщина трубы, ν – коэффициент Пуассона, p – внутреннее давление.

Для исследуемой стеклопластиковой трубы отсутствует точное значение модуля упругости, т.е. в ТУ 2296-002-26612968-2000 указаны минимальное и максимальное значения модуля упругости для всех труб, которые составляют от 17 до 25 ГПа. Вследствие этого получена теоретико-экспериментальная оценка изменения модуля упругости трубы в процессе ее нагружения внутренним давлением. В процессе нагружения трубы по всем датчикам были получены значения деформаций в каждый момент времени в соответствии с уравнением [30].

$$\varepsilon = \frac{1}{0.78} \frac{\Delta\lambda_\beta}{\lambda_\beta}, \quad (2)$$

где ε – значение величины деформации вдоль оси датчика, λ_β – резонансная длина брэгговской решетки, $\Delta\lambda_\beta$ – разница между текущей (на момент времени) длиной волны и резонансной длиной волны брэгговской решетки.

Далее уравнения (1), (2) приравнивались и были получены значения изменения модуля упругости в каждой области, где были установлены брэгговские решетки. Полученные результаты обрабатывались методами математической статистики, установлена зависимость снижения модуля упругости в процессе эксплуатации.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе проведения механических испытаний построена зависимость деформаций, регистрируемых ВОД, от внутреннего давления. Теоретическая оценка зависимости деформаций от внутреннего давления определена в соответствии с ранее описанным подходом. Зависимости значений деформации от внутреннего давления для первого этапа нагружения представлены на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость значений деформаций, регистрируемых различными ВОД,

Как видно из представленных экспериментальных данных, зависимость величин деформаций от внутреннего давления имеет линейный характер. При этом следует отметить, что значения деформации, зафиксированные ВОД (рис. 3а–в), имеют незначительные отклонения от аналитически прогнозируемых, которые варьируются от 0.64% до 6.84%. Максимальное отклонение значений деформаций составило 25.2% (рис. 3г). Полученное отклонение может быть связано с низкой чувствительностью ВБР из-за неравномерного распределения адгезионного слоя между смарт-слоем и поверхностью трубы в процессе приклейки.

Аналогичным образом были получены зависимости значений деформаций от внутреннего давления для интервала от 30 до 170 бар, которые представлены на рис. 4.

Рис. 4. Зависимость значений деформаций, регистрируемых различными ВОД,

Из представленной выше диаграммы можно сделать вывод о том, что при увеличении действующей на стенки трубы нагрузки сохраняется линейная зависимость между регистрируемыми значениями деформации и внутреннего давления. Отклонение от аналитически прогнозируемой величины составило не более 14%. Данное отклонение обусловлено тем, что волоконно-оптические датчики устанавливались на поверхность стеклопалстиковой трубы, а не внедрялись в структуру, таким образом, можно сказать, что отклонение вызвано адгезионным слоем и локальными неоднородностями, однако находится в рамках инженерной погрешности. Обобщая полученные ранее результаты, можно построить линейную зависимость регистрируемых ВОД деформаций от внутреннего давления, которая может быть описана следующим соотношением:

$$\varepsilon = k p, \quad (3)$$

где $k = 0.0000596$ – коэффициент пропорциональности, описывающий зависимость между деформациями и внутренним давлением.

На рис. 5 представлены диаграмма с экспериментально полученными данными и функция, описывающая зависимость между деформациями и внутренним давлением, приложенным к внутренним стенкам трубы.

Рис. 5. Зависимость значений деформаций, регистрируемых ВБР, от внутреннего давления

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод о том, что ВОД регистрируют внутреннее давление в некотором интервале ($\varepsilon - 14\% < \varepsilon < \varepsilon + 14\%$), находясь в котором можно гарантировать заданную величину внутреннего давления.

Полученная зависимость деформаций от времени позволяет в режиме реального времени судить об изменении внутреннего давления в трубе, что позволит в процессе эксплуатации повысить безопасность и надежность трубных конструкций нефтегазовой отрасли.

Следующей задачей исследования являлось определение области локализации разрушения трубной конструкции при ее нагружении внутренним давлением. На рис. 6 представлена зависимость значений деформаций трубы от времени для интервала от 5 до 140 бар с последующей разгрузкой и дальнейшим нагружением до разрушения, при этом разрушающее давление составило 170 бар.

Рис. 6. Зависимости значений деформации, полученные с различных ВБР, от времени

Как следует из графика, при нагружении до 140 бар ВБР102 (вблизи заделки со стороны подачи воды) регистрирует максимальные деформации, в то время как датчик 101 на этой же волоконной линии регистрирует минимальные деформации. Это связано с появлением трещин вблизи датчика 102 в процессе нагружения, что подтверждалось визуальным осмотром в процессе проведения эксперимента. Поскольку вблизи остальных ВОД трещин не зафиксировано, значения регистрируемых деформаций близки к теоретической оценке. При последующем нагружении стеклопластиковой трубы внутренним давлением значения регистрируемых ВОД деформаций ниже, поскольку в трубной конструкции уже присутствовали трещины, которые проросли в магистральные и привели к разрушению трубы. Кроме того, разрушение трубы произошло вблизи датчика 102 с полным отрывом смарт-слоя с ВБР, как показано на рис. 7.

Рис. 7. Область разрушения трубной конструкции после нагружения давлением 170 бар

Таким образом, можно сделать вывод, что применение волоконно-оптических датчиков в конструкциях композитных трубопроводов позволит создать систему контроля и прогнозирования возможности разрушения. Такая система позволит определять вероятность возникновения прорывов на магистральных и бытовых трубопроводах задолго до образования критического разрушения и возникновения аварийной ситуации и позволит перейти от плановых осмотров различных конструкций к эксплуатации этих конструкций по текущему состоянию. Подобный переход позволит сэкономить средства, затрачиваемые на плановое технологическое обслуживание трубопроводов или других конструкций, снизить риски возникновения

разрушений и избегать различных техногенных катастроф, связанных с разрушением объектов критически важной инфраструктуры РФ.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенного исследования продемонстрирована применимость волоконно-оптических датчиков для контроля внутреннего давления и локализации области разрушения трубных конструкций в процессе эксплуатации. Получены зависимости значения деформаций от внутреннего давления. Установлено, что отклонение регистрируемых волоконно-оптическими датчиками деформаций от теоретической оценки составляет не более 14%. Получена линейная зависимость деформаций от внутреннего давления, которая позволит в режиме реального времени судить об изменении давления в трубе и предотвращать возможные катастрофы, связанные с разрушением труб.

Кроме того, в работе продемонстрирована возможность регистрировать с помощью волоконно-оптических датчиков появление трещин вблизи их области расположения. При разработке соответствующих алгоритмов и при достаточно большом количестве датчиков их применение позволит локализовать трещины на всей протяженности трубных конструкций.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации для фундаментальных научных исследований (проект № FSNM-2026–0008).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

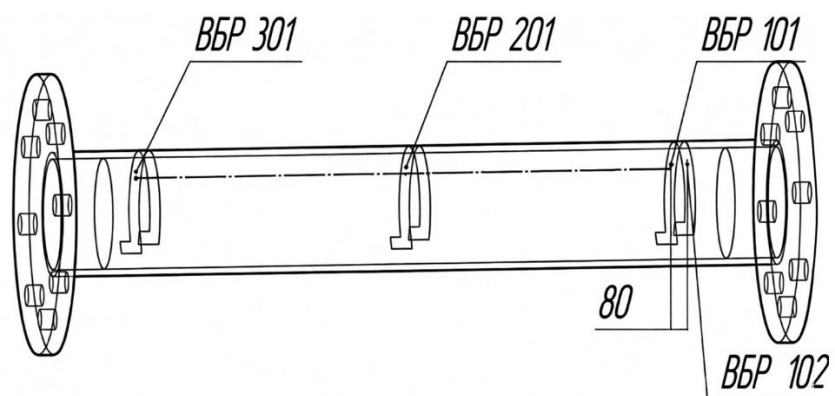
1. Zhang J., Lian Z., Zhou Z., Song Z., Liu M., Yang K. Eng. Fail. Anal. 2022. V. 141. Art. 106594. [https://doi.org/ 10.1016/j.engfailanal.2022.106594](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106594).
2. Николаев А. К., Коэльо Веласкес А. Л. Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 93.. [https://doi.org/ 10.18454/pmi.2017.1.93](https://doi.org/10.18454/pmi.2017.1.93).
3. Zhang C.C., Shi B., Gu K., Liu S.P., Wu J.H., Zhang S., Zhang L., Jiang H.T., Wei G.Q. Geophysical Research Letters. 2018. V. 45. № 21. P. 11732. [https://doi.org/ 10.1029/2018GL080428](https://doi.org/10.1029/2018GL080428).

4. *Sasaki T.* Fibre optic monitoring and finite element analysis of well integrity in methane hydrate reservoirs. PhD thesis. Cambridge: University of Cambridge, 2019.
[https://doi.org/ 10.17863/CAM.41244](https://doi.org/10.17863/CAM.41244).
5. *Николаев А.К., Лутков В.А.* Международный научно-исследовательский журнал. 2015. № 8-2(39). С. 50.
6. *Качура С.М., Постнов В.И.* Труды ВИАМ. 2019. № 5(77). С. 52.
[https://doi.org/ 10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61](https://doi.org/10.18577/2307-6046-2019-0-5-52-61).
7. *Игнатик А.А.* Нефтегазовые исследования. 2021. № 2(146). С. 114.
[https://doi.org/ 10.31660/0445-0108-2021-2-114-126](https://doi.org/10.31660/0445-0108-2021-2-114-126).
8. *Matveenko V.P., Serovaev G.S., Kosheleva N.A., Gusev G.N.* Procedia Struct. Integr. 2021. V. 33. P. 925. [https://doi.org/ 10.1016/j.prostr.2021.10.103](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.10.103).
9. *Zhao Y., Wu Q.L., Zhang Y.N.* Sensors and Actuators B: Chemical. 2018. V. 258. P. 822.
[https://doi.org/ 10.1016/j.snb.2017.11.179](https://doi.org/10.1016/j.snb.2017.11.179).
10. *Biondi Vaccariello A.M., Guo X., Zhou J., Tang Q., Gandhi H., Gopalan B., Hanna T., Ivey J., Yu T., Wang X.* Proceedings of SPIE. 2021. V. 11592. Art. 115921G. [https://doi.org/ 10.1117/12.2595377](https://doi.org/10.1117/12.2595377).
11. *Yu T., Wang J., Gandhi H., Tang Q.* Proceedings of SPIE. 2020. V. 11380. Art. 113800W.
[https://doi.org/ 10.1117/12.2559131](https://doi.org/10.1117/12.2559131).
12. *Dong X., Dou T., Dong P., Wang Z., Li Y., Ning J., Wei J., Li K., Cheng B.* Tunn Undergr. Space Technol. 2022. V. 129. Art. 104682.
[https://doi.org/ 10.1016/j.tust.2022.104682](https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104682).
13. *Jayawickrema U.M.N., Herath H.M.C.M., Hettiarachchi N.K., Sooriyaarachchi H.P., Epaarachchi J.A.* Measurement. 2022. V. 199. Art. 111543.
[https://doi.org/ 10.1016/j.measurement.2022.111543](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111543).
14. *Li K., Li Y., Dong P., Wang Z., Dou T., Ning J., Dong X., Si Z., Wang J.* Eng. Fail. Anal. 2022. V. 141. Art. 106635.
[https://doi.org/ 10.1016/j.engfailanal.2022.106635](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106635).
15. *Tan X., Fan L., Huang Y., Bao Y.* Autom. Constr. 2021. V. 132. Art. 103953.
[https://doi.org/ 10.1016/j.autcon.2021.103953](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103953).
16. *Sasaki T., Zhang S., Soga K., Luo L., Freifeld B., Kitayama Y., Kawaguchi K., Sugiyama H. J.* Nat. Gas Sci. Eng. 2021. V. 96. Art. 104309.
[https://doi.org/ 10.1016/j.jngse.2021.104309](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2021.104309).

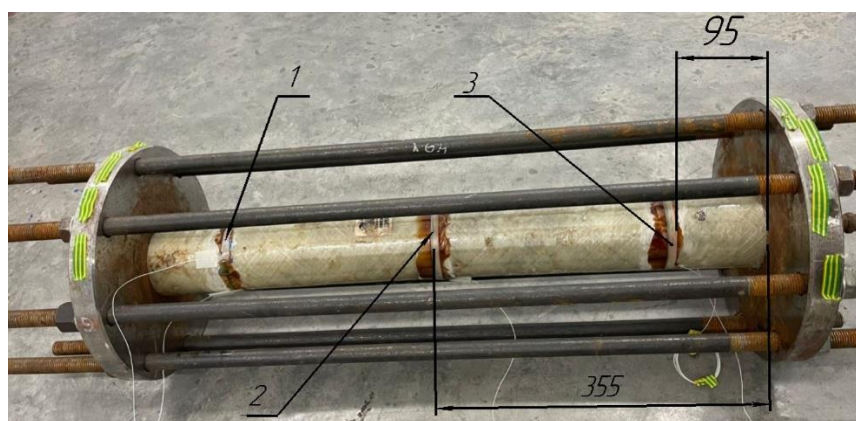
17. Biondi A.M., Zhou J., Guo X., Wu R., Tang Q., Gandhi H., Yu T., Gopalan B., Hanna T., Ivey J., Wang X. Opt. Fiber Technol. 2022. V. 70. Art. 102876.
[https://doi.org/ 10.1016/j.yofte.2022.102876](https://doi.org/10.1016/j.yofte.2022.102876).
18. Wu L., Lu S., Zhang H., Shu Q., Xiao W. Measurement. 2022. V. 199. Art. 111498.
[https://doi.org/ 10.1016/j.measurement.2022.111498](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111498).
19. Gong J., Png G.M., Arkwright J.W., Papageorgiou A.W., Cook P.R., Lambert M.F., Simpson A.R., Zecchin A.C. Measurement. 2018. V. 126. P. 309.
[https://doi.org/ 10.1016/j.measurement.2018.05.072](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.05.072).
20. Zhao Q., Zheng H.K., Lv R.Q., Gu Y.F., Zhao Y., Yang Y. Sensors and Actuators A: Physical. 2018. V. 280. P. 68. [https://doi.org/ 10.1016/j.sna.2018.07.034](https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.07.034).
21. Chen Y.C., Hsieh C.C., Lin C.C. Sens. Actuators, A Phys. 2011. V. 167. № 1. P. 63.
[https://doi.org/ 10.1016/j.sna.2011.02.035](https://doi.org/10.1016/j.sna.2011.02.035).
22. Shu Q., Wu L., Lu S., Xiao W. Measurement. 2022. V. 189. Art. 110444. [https://doi.org/ 10.1016/j.measurement.2021.110444](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110444).
23. Yang Y., Hong C., Abro Z.A., Wang L., Zhang Y. Sens. Actuators, A Phys. 2019. V. 295. P. 663. [https://doi.org/ 10.1016/j.sna.2019.06.048](https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.06.048).
24. Wang H.P., Gong X.S., Wang X.Z., Feng S.Y., Yang T.L., Guo Y.X. Measurement. 2022. V. 188. Art. 110603. [https://doi.org/ 10.1016/j.measurement.2021.110603](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110603).
25. Razali N.F., Abu Bakar M.H., Tamchek N., Yaacob M.H., Latif A.A., Zakaria K., Mahdi M.A. J. Nat. Gas Sci. Eng. 2015. V. 26. P. 135. [https://doi.org/ 10.1016/j.jngse.2015.06.020](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.020).
26. Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S., Khabibrakhmanova F.R. Mater. Phys. Mech. 2022. V. 48. № 3. P. 342. [https://doi.org/ 10.18149/MPM.4832022_5](https://doi.org/10.18149/MPM.4832022_5).
27. Shipunov G.S., Baranov M.A., Nikiforov A.S. AIP Conference Proceedings. Melville: AIP Publishing, 2022. V. 2509. Art. 020174. [https://doi.org/ 10.1063/5.0084252](https://doi.org/10.1063/5.0084252).
28. Баранов М.А., Никифоров А.С., Микрюков А.О., Ермаков Д.А. Вестник ПНИПУ. Механика. 2021. № 4. С. 162.
[https://doi.org/ 10.15593/perm.mech/2021.4.15](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2021.4.15).
29. Liu Y., Shen R., Niu D., Yan W., Zhang Y., Du G. Proceedings of SPIE. 2009. V. 7278. Art. 727819. [https://doi.org/ 10.1117/12.823167](https://doi.org/10.1117/12.823167).
30. Fedorov A.Y., Kosheleva N.A., Matveenko V.P., Serovaev G.S. Comp. Struct. 2020. V. 239. Art. 111844. [https://doi.org/ 10.1016/j.compstruct.2019.111844](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111844).

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

- Рис.1** **а** – Схема размещения датчиков на поверхности стеклопластиковой трубы; **б** – труба в испытательной оснастке: 1, 3 – смарт-слой с двумя ВБР, 2 – смарт-слой с одной ВБР
- Рис.2** Схема нагружения трубы из стеклопластика внутренним давлением: **а** – первый этап нагружения, **б** – второй этап нагружения
- Рис.3** Зависимость значений деформаций, регистрируемых различными ВОД, от внутреннего давления на интервале от 0 до 25 бар: **а** – ВБР 101, **б** – ВБР 102, **в** – ВБР 201, **г** – ВБР 301. Точками на графиках обозначены данные, регистрируемые ВОД, черная линия – аналитическая оценка деформаций, красная штриховая линия описывает линейную аппроксимацию экспериментальных данных
- Рис.4** Зависимость значений деформаций, регистрируемых различными ВОД, от внутреннего давления на интервале от 30 до 170 бар
- Рис.5** Зависимость значений деформаций, регистрируемых ВБР, от внутреннего давления
- Рис.6** Зависимости значений деформации, регистрируемых различными ВБР, от времени
- Рис.7** Область разрушения трубной конструкции после нагружения давлением 170 бар

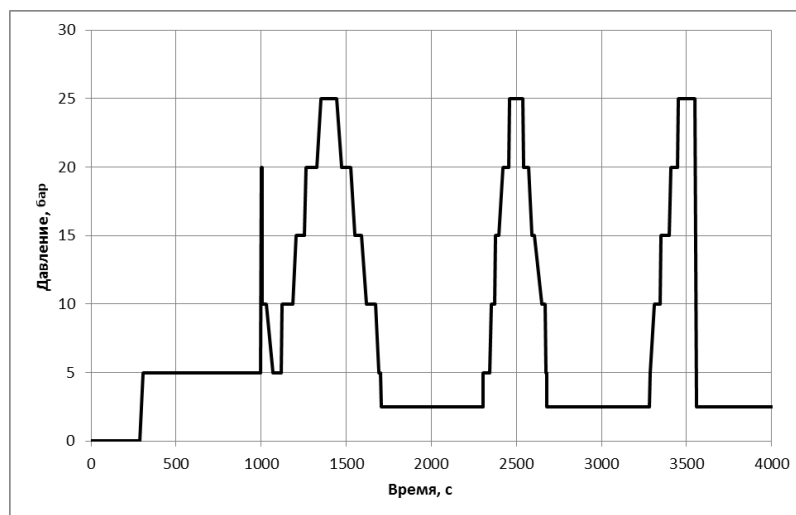


(a)

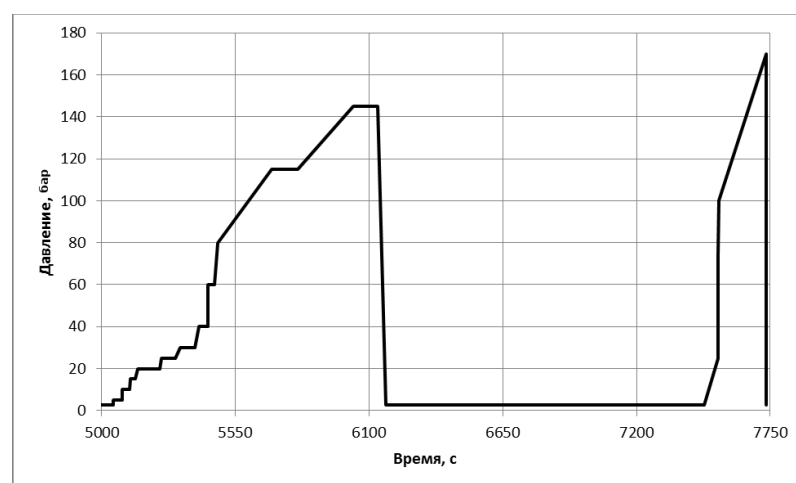


(б)

Рис.1.

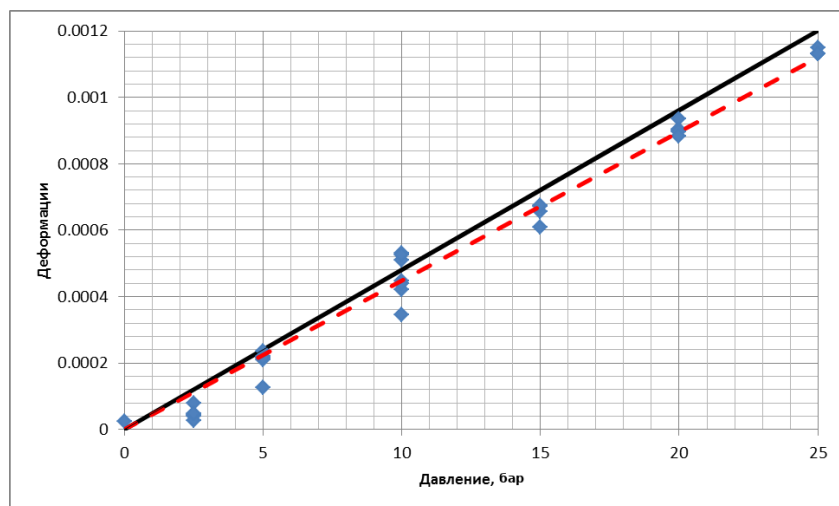


(а)

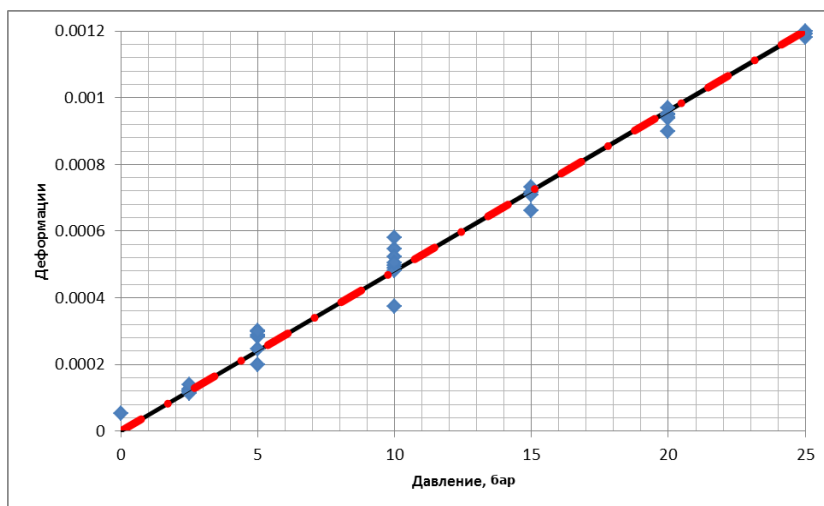


(б)

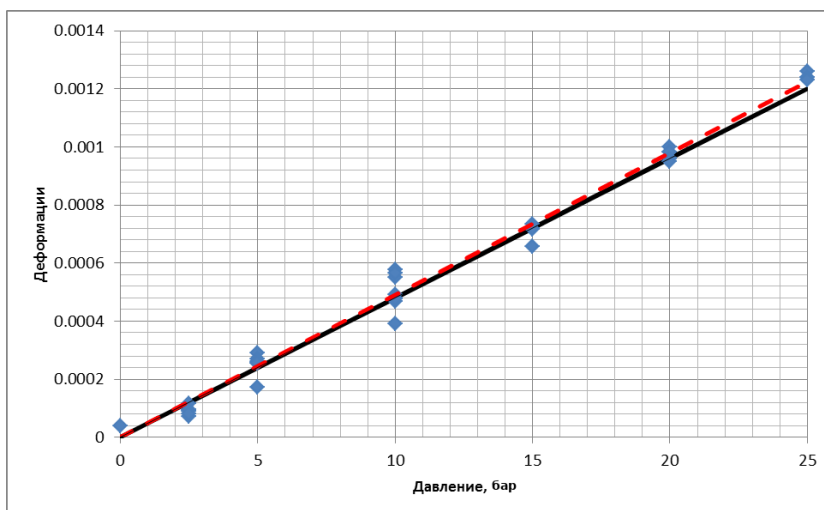
Рис.2.



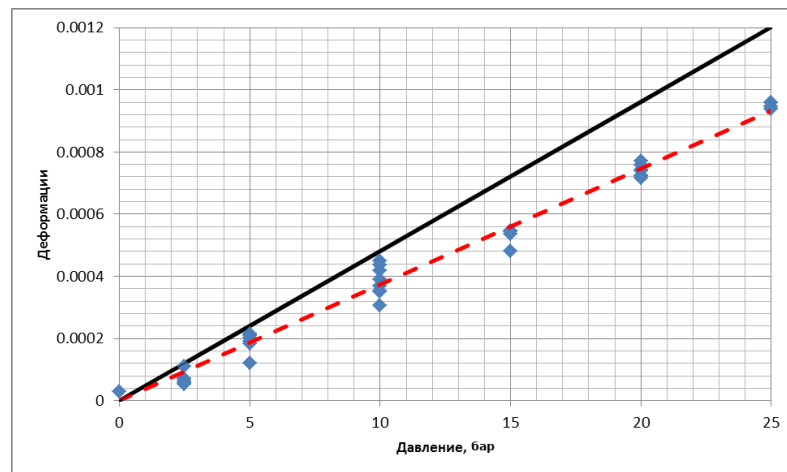
(a)



(б)



(B)



(Г)

Рис.3.

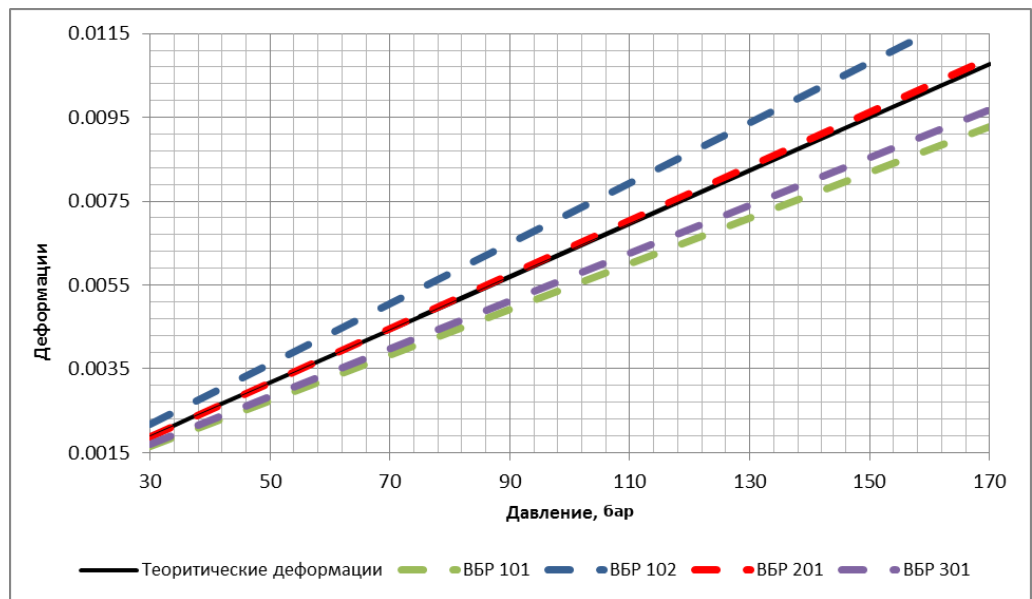


Рис.4.

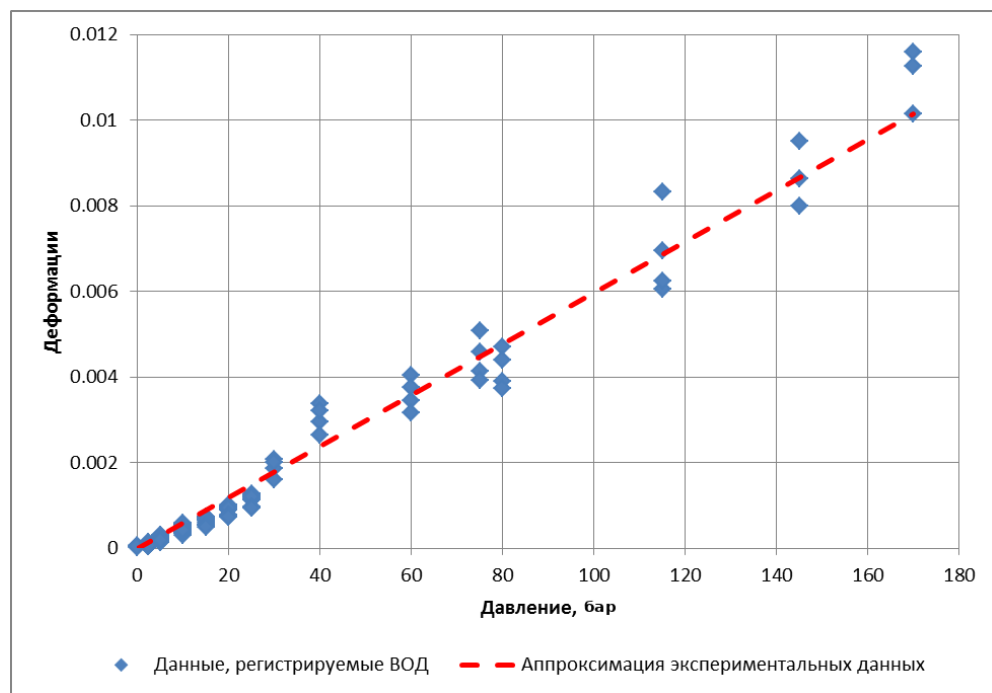


Рис.5.

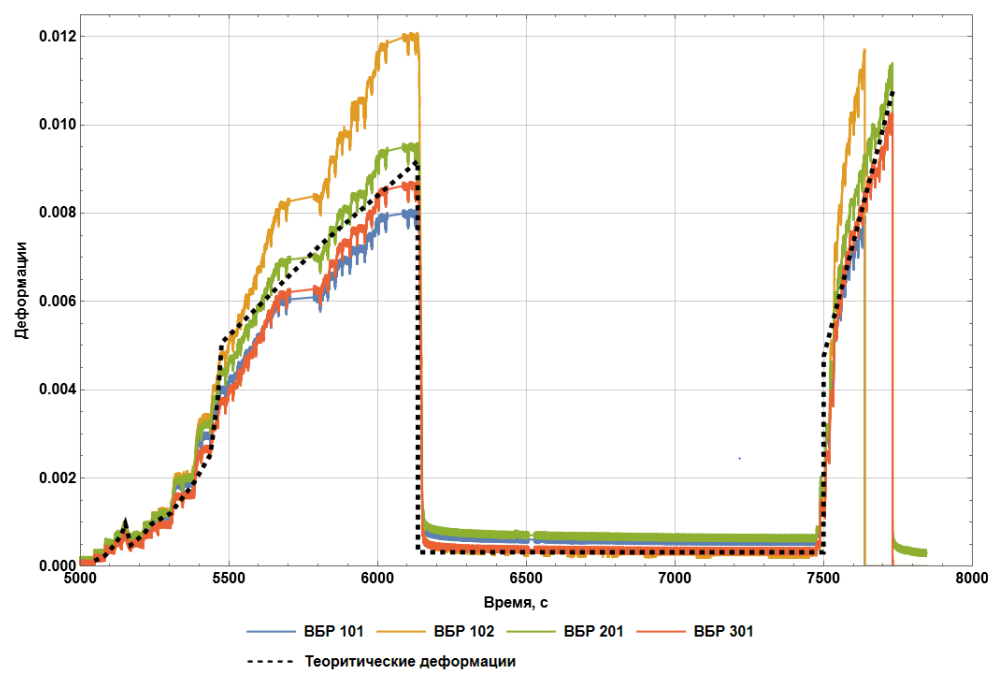


Рис.6

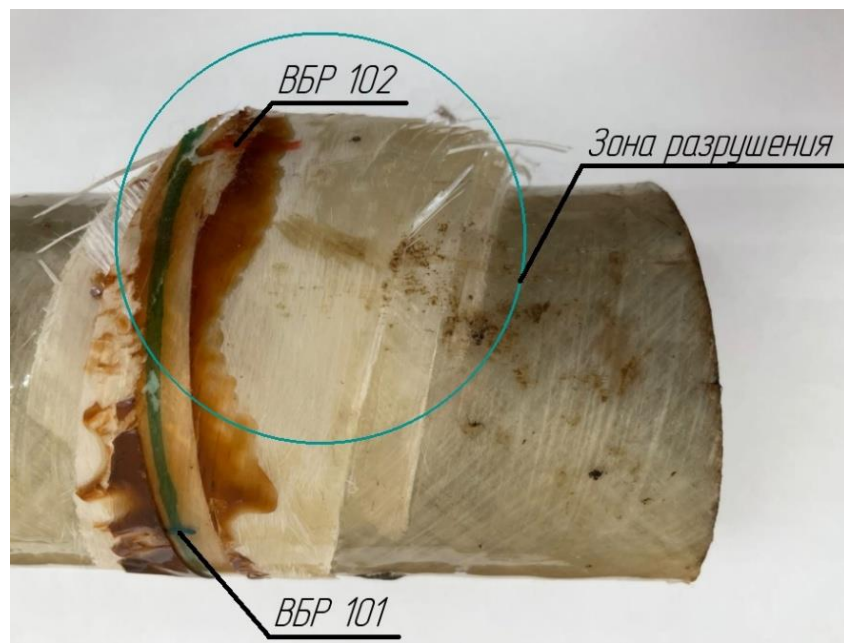


Рис.7