

Received: 03.10.2024

Revised: 29.10.2024

Accepted: 22.11.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.047-061

LABORATORY SIMULATION OF FAILURE MECHANISMS IN PIPES MADE OF FLEXIBLE AND RIGID POLYMER-REINFORCED MATERIALS AND USED IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

A. V. Fedotova^{1, a}, K. A. Perov^{1, 2, b}, and M. V. Bogatov^{1, 2, c, *}

¹*Nits Nemetall, LLC,*

1 Naberezhnaya Reki Samary St., room 33, Samara, 443036, Russia

²*Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya St., Samara, 443100, Russia*

^a  <https://orcid.org/0000-0001-8522-2654>  fedotova@nicnemetall.ru;

^b  <https://orcid.org/0009-0009-6594-7258>  perov@nicnemetall.ru;

^c  <https://orcid.org/0000-0002-6232-5666>  bogatov@npcsamara.ru

*Corresponding author. Email: bogatov@npcsamara.ru

Address for correspondence: ul. Naberezhnaya Reki Samary, 1, k. 33, Samara, 443036, Russia

Tel.: +7 (927) 768-4726

To meet the growing needs of operating organizations for reliable and uninterrupted transportation of hydrocarbon raw materials, composite pipes made of polymer materials are increasingly used. Polymer-reinforced pipes, rigid and flexible, are also used in many industries to transport bottom water, oil, and gas since they are resistant to corrosion and lighter than metal pipes. Polymer pipes with various reinforcement systems have mechanical properties that provide flexibility, strength, durability, and economic benefit in operation compared to pipes made of other materials. This paper considers using laboratory equipment to simulate the conditions of failure of rigid and flexible polymer-reinforced pipes under maximum internal pressure in order to assess their performance and predict their service life under specified operating conditions.

Keywords: polymer-reinforced pipes, maximum hydraulic failure pressure, laboratory equipment, failure mechanism

References

1. Gulin, D.A., Karpova, K.E., Glazkov, A.S., and Nasibullin, T.R. On application of pipes from polymer materials for field pipelines. *Neftegazovoe Delo*, 2020, 18 (6), 107–115. DOI: 10.17122/ngdelo-2020-6-107-115. (In Russian).
2. Volkov, A.S. Testing and diagnostics methods for composite products and fiberglass pipes. *Inzhenernaya Praktika*, 2017, 10, 8–14. (In Russian).
3. Solomonov, B.V. Composite repair of faulty regions in field pipelines. In: *Obshcheuniversitetskaya nauchnaya konferentsiya studentov i magistrantov "Ammosov–2023"* [The Ammosov–2023 University-Wide Scientific Conference for Undergraduate and Graduate Students: Proceedings]. SVFU im. M.K. Ammosova Publ., Yakutsk, 2023, pp. 905–907. (In Russian).
4. Gimaev, B.D. and Genne, D.I. The use of separation sleeves in conjunction with the tread electrochemical protection of pipelines against internal corrosion. In: *Mezhdunarodnyi Molodezhnyi Nauchno-Prakticheskiy Forum "Neftyanaya Stolitsa"* [The Third International Youth Scientific and Practical Forum "Oil capital", Nizhnevartovsk, 2020: Proceedings]. ANO TsNTR Publ., Moscow, 2020, pp. 69–73., 2020. (In Russian).

5. Vorobyov, K.A. Prevention of emergencies at main oil pipelines. *Sinergiya Nauk*, 2021, 58, 252–256. (In Russian).
6. Semenova, I.V., Florianovich, G.M., and Khoroshilov, A.V. *Korroziya i zashchita ot korrozii* [Corrosion and Corrosion Protection: Textbook]. Fizmatlit Publ., Moscow, 2010, 416 p. (In Russian).
7. Nuradinov, A.S., Uzdieva, N.S., and Akhtaev, S.S. A method for increasing corrosion resistance and performance reliability of tubing strings. In: *X Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Sovremennye Problemy Geologii, Geofiziki i Geoekologii Severnogo Kavkaza"* [The 10th All-Russian Research and Practice Conference on Modern Problems of Geology, Geophysics, and Geoecology of the North Caucasus, Vol. 10 (1): Proceedings]. OOO Format Publ., 2020, pp. 444–451. (In Russian).
8. Goldobina, L.A. and Orlov, P.S. Analysis of the corrosion destruction causes in underground pipelines and new solutions for increasing corrosion steel's resistance. *Zapiski Gornogo Instituta*, 2016, 219, 459–464. DOI: 10.18454/PMI.2016.3.459. (In Russian).
9. Goldobina, L.A. and Orlov, P.S. Ways of reducing accident risk in underground pipelines of municipal engineering. In: *Innovatsionnye protsessy v sfere servisa, problemy i perspektivy* [Innovative Processes in the Service Sector: Problems and Prospects, Vol. 2: Collection of Scientific Papers]. SPbGEU Publ., St. Petersburg, 2010, pp. 296–300. (In Russian).
10. Evtukh, G.E. and Guzenkov, A.B. Using polymer tubes for a gas transportation system. In: *XI Molodezhnaya mezhdunarodnaya konferentsiya "Novye tekhnologii v gazovoy otrasli: opyt i preemstvennost"* [The 11th International Youth Scientific and Practical Conference on New Technologies in Gas Industry: Experience and Continuity, Moscow, April 17–21, 2023: Abstracts]. Gazprom VNIIGAZ Publ., Moscow, pp. 51. (In Russian).
11. Otstavnov, A.A. Use of polymer pipes in industry applications. *Santekhnika*, 2020, 4, 50–57. (In Russian).
12. Budunov, M.A. and Fedyunina, T.V. Application of polymer pipes during the construction of the gas pipeline. In: *Sovremennye problemy i perspektivy razvitiya stroitelstva, teplogazosnabzheniya i energoobespecheniya* [The XII National Conference with International Participation "Modern Problems and Prospects of Development of Construction, Heat and Gas Supply and Energy Supply", Saratov, April 21–22, 2022: Proceedings]. Saratovskiy GAU, Saratov, 2022, pp. 23–26. (In Russian).
13. Betirsultanov, A.N. and Musostova, D.S. Technology for the use of flexible polymer pipes for to maintaining reservoir pressure. *Vestnik GGNTU. Tekhnicheskie Nauki*, 2020, 16 (4), 11–18. (In Russian).
14. Gustov, D.S. and Lyubin, E.A. Application of composite pipelines in the oil and gas industry. *Inzhener–Neftyanik*, 2016, 1, 72–78. (In Russian).
15. Pushkaruk, K.A. Flexible reinforced non-metallic pipelines – a major advance in equipping field facilities. In: *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Ratsionalnaya razrabotka mestorozhdeniy nefi i gaza: opyt, tendentsii razvitiya, potentsial"* [International Research and Practice Conference on Efficient Oil and Gas Field Development: Experience, Development Trends, Potential", Samara, April 25–27, 2022: Abstracts]. Portal Innovatsyi Publ., Samara, 2022, pp. 61–62. (In Russian).
16. Ryazantsev, V.V. and Churkin, G.Yu. Application of polymer reinforced pipes in oil and gas industry of the Russian Federation: challenging issues. In: *VIII mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Osvoenie resursov nefi i gaza rossiyskogo shelfa: Arktika i Dalniy Vostok (ROOGD–2020)"* [The VIII International conference "Russian Offshore Oil and Gas Development: Arctic and Far East" (ROOGD-2020), Moscow, November 26–27, 2020: Abstracts]. Gazprom VNIIGAZ Publ., 2020, p. 51. (In Russian).

17. Kochergina A.V. and Tomareva I.A. Analysis of modern materials for major repairs of oil and gas pipelines. In: Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya “*Aktualnye problemy i perspektivy razvitiya stroitelnogo kompleksa*” [International Research and Practice Conference on Pressing Issues and Prospects in the Development of the Construction Complex, Volgograd, December 03–04, 2019: Proceedings]. VolgGTU Publ., Volgograd, 2019, pp. 263–269. (In Russian).
18. GOST R 59910-2021. (In Russian).
19. GOST R 59834-2021. (In Russian).

Подана в журнал: 03.10.2024
УДК 691.175
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.047-061

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ МЕХАНИЗМОВ РАЗРУШЕНИЯ ТРУБ ИЗ ГИБКИХ И ЖЕСТКИХ ПОЛИМЕРНО-АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

А. В. Федотова^{1, а}, К. А. Перов^{1, 2, б}, М. В. Богатов^{1, 2, в, *}

¹ООО «НИЦ «Неметалл»,

ул. Набережная реки Самары, д. 1, ком. 33, г. Самара, 443036, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»,
ул. Молодогвардейская, 244, г. Самара, 443100, Россия

^а  <https://orcid.org/0000-0001-8522-2654>  fedotova@nicnemetall.ru;
^б  <https://orcid.org/0009-0009-6594-7258>  perov@nicnemetall.ru;
^в  <https://orcid.org/0000-0002-6232-5666>  bogatov@npcsamara.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: bogatov@npcsamara.ru

Адрес для переписки: ул. Набережная реки Самары, д. 1, ком. 33, г. Самара, 443036, Россия
Тел.: +7 (927) 768-47-26

Для удовлетворения растущих потребностей эксплуатирующих организаций в надежной и бесперебойной транспортировке углеводородного сырья все чаще используются композитные трубы из полимерных материалов. Полимерно-армированные трубы, жесткие и гибкие, также используются во многих отраслях промышленности и предназначены для транспортировки подтоварной воды, нефти и газа, поскольку они устойчивы к коррозии и имеют меньший вес по сравнению с трубами из металла. Трубы из полимерных материалов с различными системами армирования обладают механическими свойствами, которые позволяют обеспечить гибкость, прочность, долговечность и экономическую выгоду в эксплуатации по сравнению с трубами из других материалов. В данной статье рассматривается моделирование при помощи лабораторных установок условий разрушения жестких и гибких полимерно-армированных труб при максимальном внутреннем давлении для оценки их работоспособности и прогнозирования ресурса в заданных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: полимерно-армированные трубы, максимальное гидравлическое разрушающее давление, лабораторное оборудование, механизм разрушения

1. Введение

На сегодняшний день добыча и транспортировка нефтяного флюида обеспечивается путем применения металлических насосно-компрессорных труб (НКТ) и промысловых труб (ПТ), которые в эксплуатации проявили себя как прочный, надежный материал. Трубопроводный транспорт является одним из самых доступных и эффективных способов транспортировки как на большие, так и на малые расстояния жидких и газообразных углеводородных сред. В настоящее время общая протяженность промысловых трубопроводов в Российской Федерации составляет порядка 300 тысяч километров [1–3]. С начала освоения месторождений нефти и газа альтернатив в использовании металлических конструкций не было. Опыт применения стальных конструкций показывает, что наибольшее число отказов трубопроводов происходит за счет коррозионных процессов (порядка 90 %) [4–6]. Добывающие компа-

нии при строительстве и прокладке трубопроводных систем задаются целью повысить эксплуатационную надежность и увеличить сроки службы [7–9].

В связи с этим популярность начали приобретать трубы из полимерных материалов с различными системами армирования. В настоящий момент времени существуют трубы из полимерных материалов, которые используются в различных сферах деятельности, начиная с жилищно-коммунального хозяйства, горнодобывающей промышленности и заканчивая транспортировкой нефтяных и газообразных продуктов при добыче полезных ископаемых [10–12]. Наиболее распространенными представителями труб из полимерных материалов являются стеклопластиковые трубы, жесткие полимерно-армированные трубы (ЖПАТ) и гибкие полимерно-армированные трубы (ГПАТ) [13]. В свою очередь, ГПАТ можно разделить на трубы со связанными (импрегнированными) и несвязанными слоями [14]. Технические характеристики труб из полимерных материалов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технологические характеристики труб из полимерных материалов

Классификация труб	Диаметр, мм	Давление при эксплуатации, МПа	Длина трубного изделия, м	Температура перекачиваемой среды, °С
Стеклопластиковые	37–3200	до 30	6,11	до 110
ЖПАТ	90–315	до 6	6,11	до 95
ГПАТ	50–200	до 35	10–3000	до 95

Конструкция ГПАТ состоит из внутреннего защитного слоя, армирующего каркаса полимерного либо металлического типа и наружной защитной оболочки. В случае с ЖПАТ армирующий слой трубы делают исключительно из металлического каркаса. Далее в данной статье более подробно будут рассмотрены два класса полимерно-армированных труб жесткой и гибкой конструкции.

Существует ряд преимуществ использования ЖПАТ и ГПАТ по сравнению с металлическими ПТ.

- Высокая коррозионная стойкость: внутренняя и наружная оболочки изготовлены из полимерных материалов (обычно этим слоем является полиэтилен высокой плотности), которые, в свою очередь, препятствуют взаимодействию армирующего слоя трубы с агрессивной средой, а снаружи защищают поверхность от внешнего воздействия в зависимости от способа прокладывания труб (надземный, наземный либо подземный). В связи с этим нет необходимости проводить дополнительные мероприятия по защите труб от коррозии (нанесение покрытий, ингибирование, электрохимическая защита либо другие методы).
- Активная эрозионная стойкость внутренней поверхности трубы: при извлечении из пласта нефтяного флюида, содержащего частицы грунта, как правило, происходит истирание внутренней поверхности металлической трубы, при применении полимерных материалов в качестве внутренней оболочки происходит минимизация данного процесса.
- Меньший удельный вес конструкции из ГПАТ или ЖПАТ по сравнению с трубами из металлов.
- Снижение времени на строительно-монтажные работы (СМР) по сравнению с аналогичными трубами из металлов.
- Снижение гидравлического сопротивления потока среды за счет уменьшения шероховатости внутренней части трубы.

- Минимизация возникновения нежелательных факторов в виде образования солеотложений, а также образования асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) за счет уменьшения шероховатости и низкой теплопроводности.
- Увеличение сроков службы трубопроводов [15].



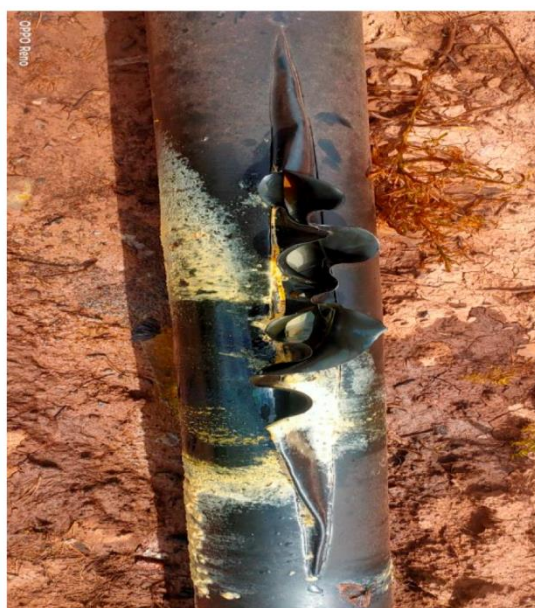
а



б



в



г

Рис. 1. Дефекты труб из полимерных материалов, возникающие в трассовых условиях при эксплуатации: разгерметизация ГПАТ по причине воздействия коррозионных процессов на армирующий каркас (*а*); сквозной дефект трубы вследствие термического воздействия и оплавление наружного слоя (*б*); разрушение ГПАТ, армированных полимерными нитями, из-за избыточного гидравлического давления (*в*); вздутие и разгерметизация по причине скопления газа в межслойном пространстве трубы ГПАТ (*г*)

У труб из полимерных материалов есть и свои особенности, связанные с обеспечением их надежности и безопасности в процессе эксплуатации. Для ЖПАТ существует ограничение по рабочему давлению до 6 МПа; существует риск в нарушении герметичности из-за возможных ошибок при монтаже муфтового соединения; за счет проникновения агрессивной среды через внутренний лайнер возможны распространение коррозионных процессов в металлическом каркасе трубы и дальнейшая разгерметизация трубопровода. Для ГПАТ не исключены коррозионные процессы в металлических фитингах, соединяющих трубы между собой, при эксплуатации в сильноагрессивных средах и при неправильном выборе материала; существует высокая вероятность скопления газов и проникновение транспортируемого флюида в пространство между слоями трубы [16]. Примеры дефектов труб из полимерных материалов, возникающих при эксплуатации в трассовых условиях, представлены на рис. 1.

Исходя из анализа статистики отказов ГПАТ в процессе эксплуатации, определили несколько характерных причин выхода из строя:

- вздутие защитного слоя в районе соединения «труба – фитинг» (негерметичность соединения);
- вздутие защитного слоя по телу трубы в отдалении от соединений (высокий газовый фактор транспортируемого продукта, скопление газа в межтрубном пространстве за счет проницаемости внутреннего полимерного лайнера);
- механические и термические повреждения внешнего защитного слоя (человеческий фактор, нарушение правил эксплуатации полимерных трубопроводов);
- разрушение трубопровода от воздействия избыточного гидравлического давления (нарушение условий гидравлических испытаний либо режима эксплуатации, неверно выбранный коэффициент запаса);
- разрушение трубопровода вследствие падения прочностных характеристик армирующего слоя, т. е. деградация свойств армирующего слоя в результате воздействия агрессивных компонентов транспортируемой среды (коррозия металлической ленты, изменение свойств полимерного армирующего слоя).

Безусловно, полимерно-армированные трубы все чаще приходят на замену трубам из металла благодаря их преимуществам, но следует учитывать, что для каждого условия эксплуатации следует выбирать наиболее подходящую конструкцию ПАТ. Уже сейчас такие трубы широко применяются в нефтегазовой отрасли для транспортировки сырой нефти, нефтепродуктов, природного газа и товарной воды [17].

Целью данной работы является моделирование механизмов разрушения труб из жестких полимерно-армированных труб и гибких полимерно-армированных труб в лабораторных условиях путем проведения испытаний при максимальном разрушающем внутреннем давлении для оценки работоспособности и прогнозирования прочности труб в заданных условиях эксплуатации.

2. Материал и методика

Для моделирования разрушения труб в лабораторных условиях были взяты следующие объекты испытаний.

Объект 1 – гибкая полимерно-армированная труба со связанными слоями, предназначенная для транспортировки подтоварной воды, нефтяных и газовых сред и обладающая повышенной термостойкостью и внутренним барьерным слоем из полиамида (наружный диаметр – 125 мм, длина – 1000 мм, количество образцов в испытании – 3 шт.), эскиз конструкции которой представлен на рис. 2 (полиэтиленовая труба).

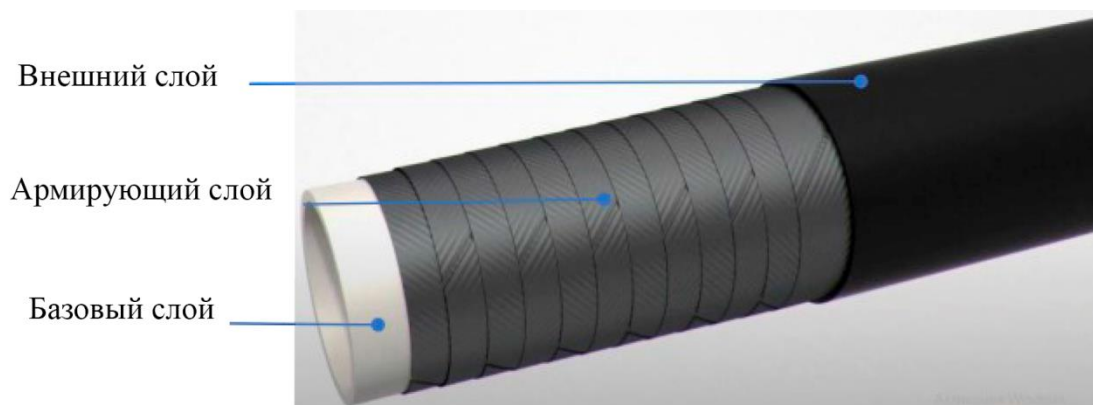


Рис. 2. Эскиз конструкции гибкой полимерно-армированной трубы

Объект 2 – жесткая полимерно-армированная труба многослойной конструкции, в которой армирующий каркас, состоящий из продольных и поперечных стальных проволок, импрегнирован в полиэтилен. Можно выделить внутренний и наружный защитные полимерные слои, которые препятствуют воздействию агрессивных факторов на армирующий металлический каркас, придающий жесткость и прочность общей конструкции. Эскиз конструкции ЖПАТ представлен на рис. 3.

Для проведения испытаний использовалась ЖПАТ, представляющая из себя полиэтиленовую трубу, армированную металлическим каркасом из стальной проволоки в продольном и кольцевом направлении, с наружным диаметром 125 мм, длиной 1000 мм (в количестве 3 штук).

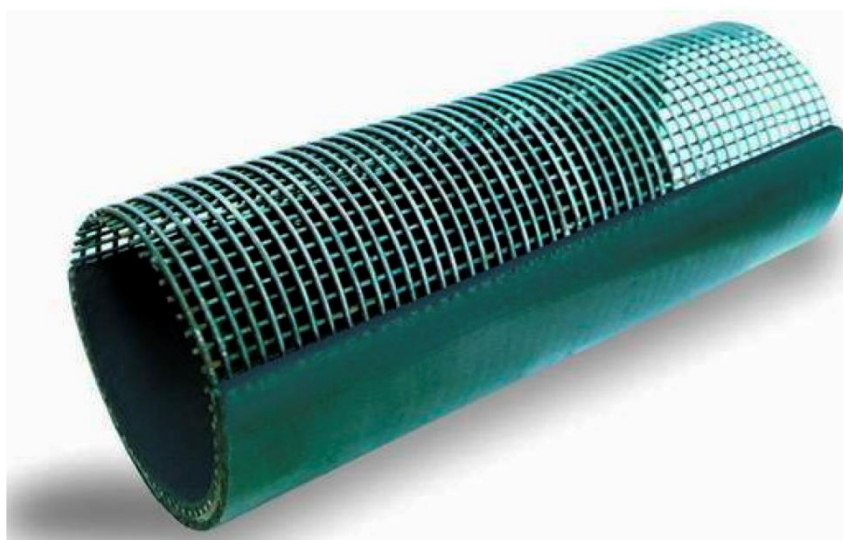


Рис. 3. Эскиз конструкции жесткой полимерно-армированной трубы

Согласно основным нормативным документам, регламентирующим проведение лабораторных испытаний (ГОСТ Р 59910-2021 [18] для ЖПАТ и ГОСТ Р 59834-2021 для ГПАТ [19]), критерием оценки выбрано «Определение разрушающего давления труб», значение разрушающего давления должно соответствовать нормативному показателю, указанному в паспорте на трубу. Разрушающее давление характеризует коэффициент запаса прочности конструкции ПАТ по отношению к рабочему давлению эксплуатации. Согласно требованиям ГОСТ, допустимым механизмом разрушения ПАТ является разрушение по телу трубы, к не-

допустимым же видам разрушения относятся разрушение металлического фитинга на торце образца либо разрушение в зоне обжатия «фитинг – полимер».

Суть метода заключается в создании избыточного гидравлического давления внутри образца до его разрушения. Испытания выполняются в испытательном комплексе (рис. 4), представляющем собой набор оборудования и устройств для моделирования физических воздействий на трубу. Оборудование включает в себя блок-мультипликатор для создания внутреннего давления и испытательную камеру для проведения испытания на определение разрушающего давления, а также необходимый инструмент, устройства и приспособления для монтажных, такелажных и слесарных работ при установке и снятии образцов в процессе испытаний. Блок-мультипликатор используется для создания испытательного давления до 700 бар. Образцы труб нагружают внутренним давлением с помощью насоса с постоянной скоростью $1 \pm 0,05$ МПа/мин до разрушения образца. Скорость повышения давления устанавливают таким образом, чтобы разрушение образца произошло в интервале от 60 до 70 секунд.

Перед началом испытания производят наполнение испытательного образца трубы водой до полного исключения воздуха из внутреннего пространства трубы, затем трубу помещают в испытательную камеру. Испытательная камера представляет собой изолированный бокс, оснащенный системой видеонаблюдения. В ходе испытания регистрируют значение разрушающего давления $P_{\text{разр}}$ (МПа) и время до разрушения образца.



Рис. 4. Установка для проведения гидравлических испытаний до разрушения: внешний вид камеры со шкафом управления и насосом (а); камера испытания образцов на максимальное разрушающее давление (б)

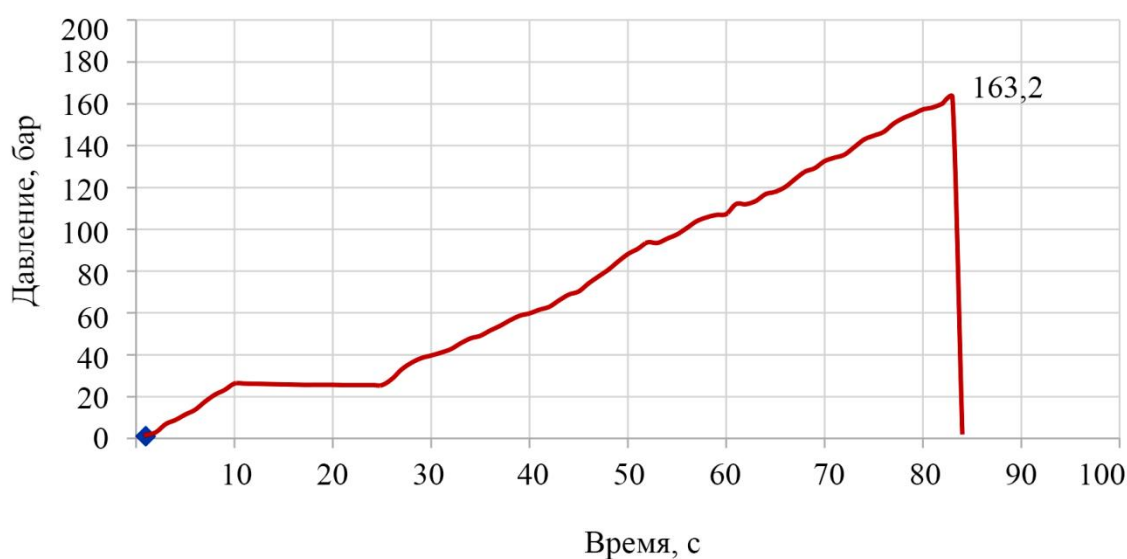
3. Результаты и обсуждение

Выполнено по 3 испытания для каждой конструкции трубы, определены значения разрушающего давления. Полученные значения по максимальному гидравлическому давлению разрушения труб представлены в табл. 2. После завершения испытаний каждый образец извлекали из испытательной камеры и осматривали. Фотографии внешнего вида образцов труб после испытаний на разрушающее давление и графики изменения давления представлены на рис. 5–7.

Таблица 2

Гидравлические характеристики максимального внутреннего разрушающего давления образцов полимерно-армированных труб

№ образца	Конструкция трубы	Давление разрушения, МПа	Контрольное значение разрушения, МПа	Место разрушения
1	ЖПАТ	15,9	$\geq 12,0$	По телу
2		14,2	$\geq 12,0$	По телу
3		16,3	$\geq 12,0$	По телу
1	ГПАТ	15,0	$\geq 12,0$	По телу
2		14,2	$\geq 12,0$	По телу
3		14,9	$\geq 12,0$	По телу



а



б

Рис. 5. Результаты испытаний ЖПАТ (образец 1): график изменения давления (а); область разрушения (б)

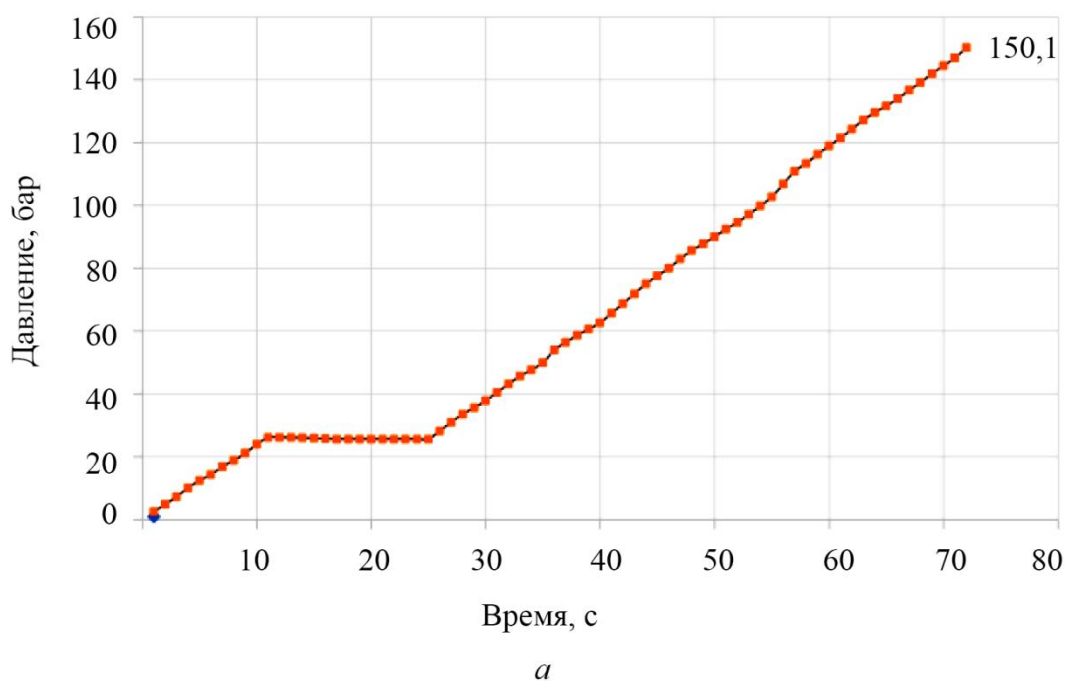
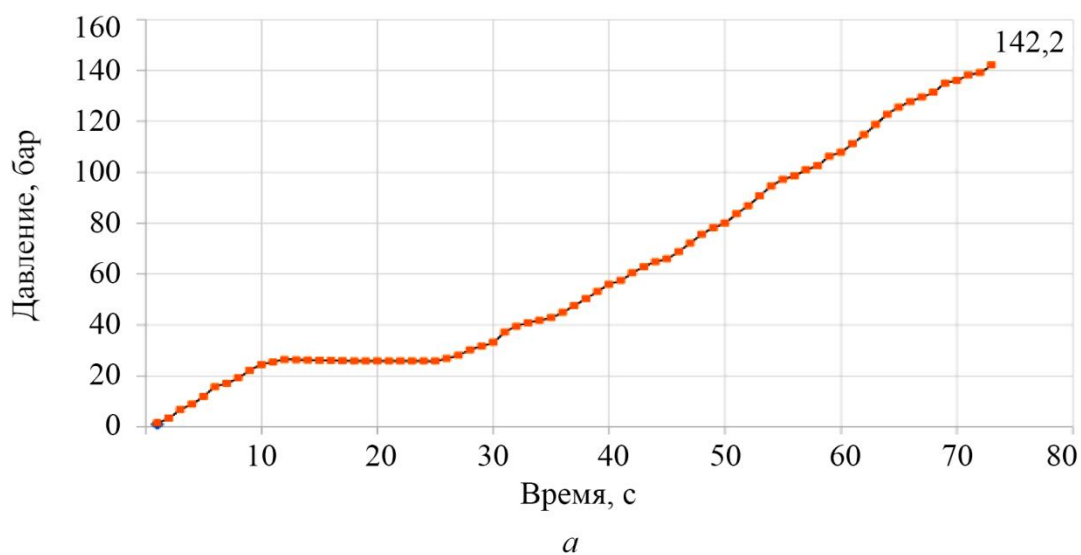


Рис. 6. Результаты испытаний ГПАТ (образец 1): график изменения давления (а); область разрушения под углом намотки нитей (б)



б

Рис. 7. Результаты испытаний ГПАТ (образец 2): график изменения давления (*а*);
область разрушения в продольном направлении (*б*)

По результатам проведенных гидравлических испытаний все испытываемые образцы были разрушены при давлении, превышающем установленное нормативное значение 12 МПа, разрушение образцов произошло по телу, что свидетельствует об успешном прохождении испытания.

При проведении лабораторных испытаний по определению максимального разрушающего гидравлического давления образцов ЖПАТ был определен механизм разрушения (табл. 2 и рис. 5). Разрушение трубы произошло за счет давления на армирующий каркас трубы, что привело к его деформации, потери жесткости конструкции и дальнейшей разгерметизации полиэтиленовой оболочки. Кольцевая и продольная армирующая оболочки соединяются при помощи точечной сварки. В данном случае давления 16,3 МПа оказалось достаточно для того, чтобы нарушилась прочность сварных соединений металлического каркаса и затем произошла дальнейшая деформация полиэтиленового лайнера с последующим разрывом и разгерметизацией внутренней оболочки. В целом представить схему разрушения ЖПАТ можно следующим образом: *подача давления в тело трубы → постепенное увеличение давления со скоростью $1 \pm 0,05$ МПа/мин → увеличение объемов трубы (расширение по диаметру) за счет воздействия внутреннего гидравлического давления → локальное разрушение металлического каркаса → утонение внутреннего лайнера и наружной защитной оболочки трубы → разгерметизация.*

Таким образом, значение разрушающего давления ЖПАТ напрямую зависит от качества сварки армирующего каркаса.

При исследовании гидравлического разрушения ГПАТ были обнаружены разные механизмы разгерметизации исследуемых труб.

На рис. 6 представлен фрагмент трубы после проведения испытаний. Видно, что характер разрушения представляет собой разрыв оболочки в направлении намотки армирующих нитей под углом 53° (образец 1). Разрушение сопровождалось выходом наружу волокон армирующих нитей. Для другой трубы этой же конструкции (образец 2), внешний вид после испытаний которой представлен на рис. 7, картина разрушения иная, здесь можно увидеть совсем другой характер направления разрыва трубы: прямолинейный в направлении продольной армирующей нити. Так же как и в предыдущем случае, разрушение сопровождалось выходом наружу волокон армирующих нитей. Таким образом, разрушение трубы ГПАТ можно описать следующими этапами: *подача давления в тело трубы → постепенное увеличение давления со скоростью $1 \pm 0,05$ МПа/мин → увеличение объемов трубы (расширение по диаметру) за счет воздействия внутреннего гидравлического давления → разрыв армирующих нитей → утонение внутреннего лайнера и наружной защитной оболочки трубы → разгерметизация.*

Разгерметизация трубы происходит в месте разрыва армирующей нити, а разрыв нити возникает там, где прочностные характеристики нитей меньше максимального гидростатического давления трубы. Прогнозирование места ослабления армировки затруднено массой внешних факторов (сила натяжения нити при намотке каркаса, усилие обжима фитинга и другие механические воздействия, создающие неравномерную нагрузку на армирующий каркас).

4. Заключение

При моделировании параметра максимального внутреннего гидравлического давления определяется коэффициент запаса прочности конструкции трубы и характерный механизм разрушения различных видов полимерно-армированных труб как жесткого, так и гибкого исполнения. Понимание и прогнозирование допустимого механизма разрушения ПАТ позволит избежать разгерметизации, порывов трубопроводов на скважинах. Определение данного механизма позволит расширить внедрение полимерно-армированных труб в практику трубо-

проводного транспорта нефтегазовой отрасли на поздней стадии разработки месторождений, когда транспортируемый флюид является высокообводненным, сильноминерализованным, с высокой коррозионной агрессивностью, но следует наработать большую статистику по различным композициям представленных на рынке неметаллических изделий.

Литература

1. О применении труб из полимерных материалов для промышленных трубопроводов / Д. А. Гулин, К. Е. Карпова, А. С. Глазков, Т. Р. Насибуллин // Нефтегазовое дело. – 2020. – № 6. – С. 107–115. – DOI: 10.17122/ngdelo-2020-6-107-115.
2. Волков А. С. Методы испытаний и диагностики композитных изделий и стеклопластиковых труб // Инженерная практика. – 2017. – № 10. – С. 8–14.
3. Соломонов Б. В. Композитный ремонт дефектных участков промышленных трубопроводов // Аммосов–2020: общеуниверситетская научная конференция студентов и магистрантов, Якутск, 04–17 апреля 2020 г. : сборник трудов. – Якутск : СВФУ им. М. К. Аммосова, 2023. – С. 905–907.
4. Гимаев Б. Д., Генне Д. И. Применение рассекающих втулок с протекторной электрохимической защитой трубопроводов от внутренней коррозии // Нефтяная столица: третий международный молодежный научно-практический форум. – Нижневартовск : АНО ЦНТР, 2020. – С. 69–73.
5. Воробьев К. А. Предотвращение чрезвычайных ситуаций на магистральных нефтепроводах // Синергия Наук. – 2021. – № 58. – С. 252–265.
6. Семенова И. В., Флорианович Г. М., Хорошилов А. В. Коррозия и защита от коррозии : учеб. пособие – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Физматлит, 2010. – 416 с.
7. Нурадинов А. С., Уздиева Н. С., Ахтаев С. С. Способ повышения коррозионной стойкости и эксплуатационной надежности насосно-компрессорных труб // X Всероссийская научно-техническая конференция «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа», Грозный, 14–16 октября 2020 г. : сборник трудов конференции. – Т. X (1). – Грозный : ООО «Формат», 2020. – С. 444–451.
8. Голдобина Л. А., Орлов П. С. Анализ причин коррозионных разрушений подземных трубопроводов и новые решения повышения стойкости стали к коррозии // Записки горного института. – 2016. – Т. 219. – С. 459–464.
9. Голдобина Л. А., Орлов П. С. Пути снижения аварийности на подземных трубопроводах коммунального хозяйства // Инновационные процессы в сфере сервиса: проблемы и перспективы : сборник научных трудов по результатам II Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 16 июня 2010 г. – СПб. : СПбГЭУ, 2010. – Т. 2. – С. 296–300.
10. Евтух Г. Е., Гузенков А. В. Применение полимерных труб в газотранспортной системе // XI Молодежная международная научно-практическая конференция «Новые технологии в газовой отрасли: опыт и преемственность», Москва, 17–21 апреля 2023 г. : тезисы. – Москва : Газпром ВНИИГАЗ, 2023. – С. 51.
11. Отставнов А. А. Применение полимерных труб в промышленности // Сантехника. – 2020. – № 4. – С. 50–57.
12. Будунов М. А., Федюнина Т. В. Применение полимерных труб при строительстве газопровода // Современные проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения. – Саратов : Саратовский ГАУ, 2022. – С. 23–26.
13. Бетирсултанов А. Н., Мусостова Д. Ш. Технология применения гибких полимерных труб для водоводов поддержания пластового давления // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 11–18. – DOI 10.34708/GSTOU.2020.27.22.002.
14. Густов Д. С., Любин Е. А. Применение композитных трубопроводов в нефтегазовой промышленности // Инженер-нефтяник. – 2016. – № 1. – С. 72–78.

15. Пушкарук К. А. Гибкие неметаллические армированные трубопроводы – новое слово в оснащении объектов обустройства месторождений // Международная научно-практическая конференция «Рациональная разработка месторождений нефти и газа: опыт, тенденции развития, потенциал», Самара, 25–27 апреля 2022 г. : тезисы. – Самара : Общество с ограниченной ответственностью «Портал Инноваций», 2022. – С. 61–62.
16. Рязанцев В. В., Чуркин Г. Ю. Проблемные вопросы применения полимерных армированных труб в нефтегазовой отрасли РФ // VIII Международная научно-техническая конференция «Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток», Москва, 26–27 ноября 2020 г. : тезисы. – Москва : Газпром ВНИИГАЗ, 2020. – С. 51.
17. Кочергина А. В., Томарева И. А. Анализ современных материалов при капитальном ремонте нефтегазопроводов // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса, Волгоград, 03–04 декабря 2019 г. : сборник трудов конференции. – Волгоград : Волгоградский государственный технический университет, 2019. – С. 263–269.
18. ГОСТ Р 59910-2021. Трубы полимерные, армированные металлическим каркасом, и соединительные детали к ним. Общие технические условия. – М. : Российский институт стандартизации, 2022. – 40 с.
19. ГОСТ Р 59834-2021. Трубы гибкие полимерные армированные и соединительные детали к ним. Общие технические условия. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 36 с.