

УДК 691.175.5/.8

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ ПОЛИМЕРОВ С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВА С ЦЕЛЬЮ ЛИКВИДАЦИИ НЕСПЛОШНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ КОЛОННЫ© 2025 С.Б. Ермаков¹, Д.В. Нечаев², В.Н. Хашба³, П.Е. Крук⁴, В.Д. Мануйлов⁵¹ Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия³ ООО «НЕО ИНЖИНИРИНГ», г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 26.09.2025

В настоящей работе была рассмотрена и доказана принципиальная возможность применение полимеров с эффектом памяти формы для изготовления устройства, предназначенного для ликвидации несплошности эксплуатационной колонны с применением методов физического и математического моделирования. Определено, что дополнительно армирование нитиноловой сеткой не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние конструкции и, следовательно, не является необходимым. Показано, что опытный термопластичный полимер с ЭПФ обладает высокой стойкостью к декомпрессии в водном растворе и химической стойкостью к 20% водному раствору HCl. Однако установлена необходимость дополнительных исследований по подбору материала, обладающим более высокой стойкостью к различным углеводородам.

Ключевые слова: эффект памяти формы, несплошность эксплуатационной колонны, полимер, армирование, математическое моделирование, эксплуатационные свойства.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-331-338

EDN: TQVHTO

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Разработка комплексной модели надежности, работоспособности и определяющих показателей качества трубопроводных систем северного исполнения» (FEWN-2025-0001)

ВВЕДЕНИЕ

Нефтегазовый сектор России, особенно на объектах расположенных в Арктической зоне, сталкивается с нарастающими системными вызовами, ключевыми среди которых являются неизбежное увеличение стоимости добычи углеводородов на большинстве разрабатываемых месторождений и усугубляющийся технологический разрыв в области критически важных технологий и материалов [1]. Преодоление этих вызовов требует масштабного технологического обновления отрасли, в центре которого находится разработка и внедрение инновационных материалов и технологий. Как показывают исследования аналитических агентств, таких как IHS Markit, подобные инновации способны обеспечить значительное снижение капитальных и операционных затрат, демонстрируя экономическую эффективность на уровне 18–20% после их интеграции в нефтегазовый комплекс [2]. Одним из наиболее перспективных направлений выступает применение уникальных материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ) [3], включающих как металлические, например, сплавы на основе никелида титана, так и полимерные композиции [4, 5].

Согласно работе [6] актуальной задачей является разработка эффективных инженерных решений для борьбы с возникающей несплошностью эксплуатационной колонны (НЭК). НЭК представляет собой нарушение целостности обсадной колонны, приводящее к потере ее герметизирующей функции и неконтролируемой коммуникации между стволом скважины и окружающим пластом [7, 8]. При этом природа и морфология НЭК крайне различны, и имеют геометрию от локальных свищей малого размера (до 5 мм), обусловленных коррозионными процессами, до протяженных каналов и разгерметизированных соединений, возникших вследствие механических воздействий [9, 10].

Анализ существующих методов ликвидации НЭК, таких как цементные мосты, установка внутренних пакеров или ловушек, ремонтные муфты, различные методы цементации под давлением, Ермаков Сергей Борисович, кандидат технических наук, директор центра технологических инициатив.

E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

Нечаев Даниил Валерьевич, инженер-исследователь лаборатория ресурса материалов. E-mail: nechaeв_dv@spbstu.ru
Хашба Валерия Нугзаровна, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории виртуально-имитационного моделирования. E-mail: hashba_vn@spbstu.ru

Крук Павел Евгеньевич, инженер-исследователь научно-технологического комплекса «Новые технологии и материалы». E-mail: kruk_pe@spbstu.ru

Мануйлов Владимир Дмитриевич, генеральный директор.

выявляет их существенные недостатки [11]. Эти технологии зачастую характеризуются либо недостаточной эффективностью и надежностью, особенно при сложной конфигурации дефекта или в старых скважинах, либо чрезмерной трудоемкостью и длительностью проведения работ, либо высокими ресурсными и финансовыми затратами [12, 13].

Таким образом, существует потребность в разработке принципиально новых, высокоэффективных и экономичных технологий ремонта НЭК. Материалы с ЭПФ, благодаря своей способности к обратимым деформациям в заданных условиях, обладают уникальным потенциалом для создания таких технологий, в частности, в виде интеллектуальных ремонтных элементов, например втулок или пластырей, способных к саморасширению и обеспечению надежного контакта и герметизации в зоне НЭК [14]. При этом применение полимеров с ЭПФ в качестве материала для создания устройства для ликвидации НЭК является более предпочтительным в связи с низкой плотностью и высокой коррозионной стойкостью. Однако на сегодняшний день на рынке отсутствуют готовые решения из полимеров с ЭПФ для ликвидации НЭК.

Поэтому **целью** настоящей работы являлась оценка применимости полимеров с эффектом памяти формы для изготовления устройства, предназначенного для ликвидации несплошности эксплуатационной колонны.

Для достижения поставленной цели решали следующие задачи:

1. Изготовить прототип умного полимерного пластыря методом послойного наплавления материала.
2. Оценить работоспособность прототипа методами физического и математического моделирования.
3. Разработать способы оптимизации предложенного решения и проверить его работоспособность методами математического моделирования.
4. Определить работоспособность полимера с ЭПФ внутри скважины методами физического моделирования.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования являлись втулка, с диаметром 63 мм и толщиной 2 мм, стандартные образцы 1В в соответствии с ГОСТ 11262–2017, и пластины с габаритами 50×50×3 мм, изготовленные из термопластичного полиэфирного эластомера (ТПЕЕ).

Производство изделий осуществляли методом FDM печати с применением настольного принтера Comproser A4 по технологии коэкструзии. В качестве материала для армирования использовали композитное армирующее волокно Anisoprint CCF 1,5k 0,35 мм.

Математическое моделирование выполняли в программном комплексе Abaqus FEA методом конечных элементов. Геометрические параметры пластыря, дефекта НЭК и внутрискважинные условия задавали на основании переданных данных, представленных нефтегазовой компанией РФ. При моделировании рассматривали слоеный пластырь, состоящий из полимерной матрицы с ЭПФ и углеволокна, расположенных последовательно под углами 45° и -45° относительно главной оси. Параметры механических свойств пластыря приведены в таблице 1 [15].

Таблица 1. Свойства ортотропного материала [15]

E_{11} (ГПа)	E_{22} (ГПа)	E_{33} (ГПа)	G_{12} (ГПа)	G_{13} (ГПа)	G_{23} (ГПа)	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}
129	9,5	9,8	4,7	4,7	3,2	0,34	0,34	0,52

В качестве дополнительного армирования использовали проволоку из нитинола марки ТН1, диаметром 1 мм со свойствами в соответствии с ТУ 18.4270–001–16980791–2013. Армирование представляет собой сетку с углом плетения 60° и шагом плетения 47,2 мм и состоит из набора спиралей, ориентированных по часовой и против часовой стрелки. Связь армирования с телом пластыря реализовано с использованием встроенного метода Embedded region пакета Abaqus, обеспечивающего совместное перемещение узлов конечноэлементных сеток армирования и пластыря. Процесс восстановления формы пластыря моделировался в соответствии с методикой, изложенной в работе [15]. В расчетах задавались следующие нагрузки: внутренне давление - 174 атм, внешнее давление - 120 атм. На сегмент торцевой поверхности верхней части пластыря прикладывалась осевая нагрузка 117 кН, имитирующая воздействие различного внутрискважинного оборудования в нестандартных ситуациях. Для оценки работоспособности разработанного решения с применением методов математического моделирования анализировались следующие показатели: статус контактного взаимодействия, распределение напряжений в материале пластыря, радиальные и вертикальные перемещения пластыря при ликвидации НЭК.

Физическое моделирование работы пластыря проводили по собственно разработанной методике, заключающейся в предварительной деформации пластыря в прессформе при температуре 110°C, с последующей установкой ее в трубу с внутренним диаметром 100 мм и нагревом до температуры 120°C.

Моделирование декомпрессионного сброса давления и оценку маслостойкости (в модельном 20% водном растворе HCl и имитаторе нефтепродуктов (толуол/о-ксилол с соотношением 1:1)) материала проводили по ГОСТ Р 58346–2019 и ГОСТ 12020–2018 соответственно. Изменение массы образцов оценивали при помощи взвешивания образцов до и после испытаний с применением лабораторных электронных весов CE24–С с точностью измерений 0,0001 г. ВИК проводили в соответствии с ГОСТ 12020–2018. Оценку механических свойств проводили по ГОСТ 11262–2017 с использованием разрывной машины Zwick/Roell Z050. Скорость растяжения образцов составляла от 10 мм/мин до 100 мм/мин. Твердость определяли по ГОСТ Р 263–75 с использованием твердомера LX-A.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Математическое моделирование работы пластыря

Так как наиболее опасным и сложным для ликвидации видом дефекта эксплуатационной колонны является кольцевая несплошность, оценку работоспособности пластыря проводили при моделировании её устранения с дополнительным воздействием на торец пластыря внутрискважинным оборудованием. В рамках исследования были рассмотрены два варианта конструкции пластыря: без армирования нитиноловой сеткой и с армированием сеткой из нитинола.

На рисунке 1 представлен статус контактного взаимодействия для обоих вариантов пластыря после нагружения сегмента его торца. Красная область соответствует полному контакту, зеленая область – контакту с проскальзыванием, синяя область – потере контакта.

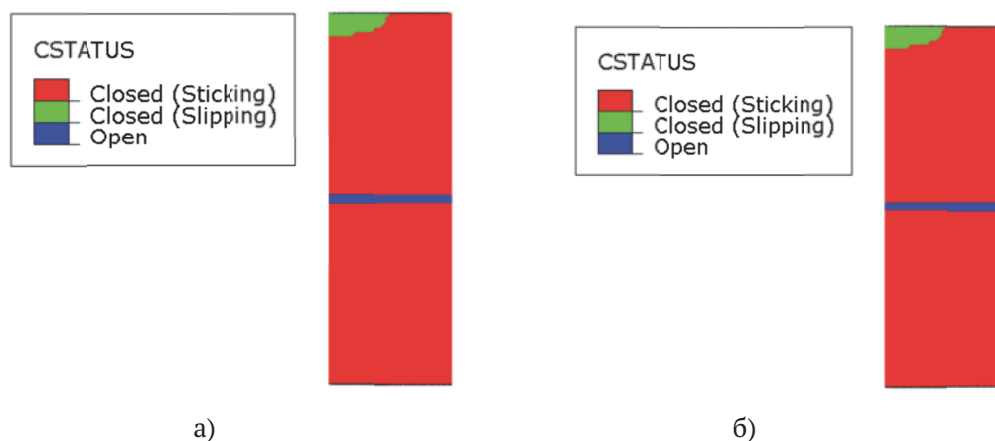


Рисунок 1 – Статус контакта:

(а) пластырь без дополнительного армирования; (б) пластырь с дополнительным армированием нитинолом

В результате моделирования контактного взаимодействия определено, что после установки и активации пластыря потеря контакта пластыря с телом эксплуатационной колонны не наблюдается ни для одной из рассматриваемых конструкций, что в свою очередь подтверждает работоспособность пластырей обоих типов. При этом отмечено незначительное проскальзывание верхней части пластыря под воздействием нагрузки от воздействия внутрискважинного оборудования.

Результаты расчета возникающих напряжений при работе пластыря приведены на рисунке 2.

Анализ распределения напряжений показал, что возникающие напряжения в обоих вариантах пластыря при ликвидации кольцевой несплошности не превышают предела прочности полимерной матрицы, армированной углеродом (максимальное напряжение в пластыре без дополнительного армирования достигают 177 МПа, а в нитиноловой проволоке - 100 МПа, что в несколько раз ниже пределов прочности соответствующих материалов). Это также подтверждает работоспособность обоих конструктивных решений. Отмечено, что поля напряжений в теле пластыря практически совпадают для обеих конфигураций, что позволяет сделать вывод об незначительном влиянии на напряженно-деформированное состояние конструкции. При этом максимальные вертикальные (осевые) перемещения составляют 0,1 мм как для пластыря с армированием нитинолом, так и без него (рисунок 3), что также свидетельствует о пригодности обоих технических решений.

Таким образом, по результатам математического моделирования установлено, что разработанная принципиальная геометрия пластыря удовлетворяет трем основным критериям работоспособности решения при ликвидации НЭК: сохранение контактного взаимодействия по всей поверхно-

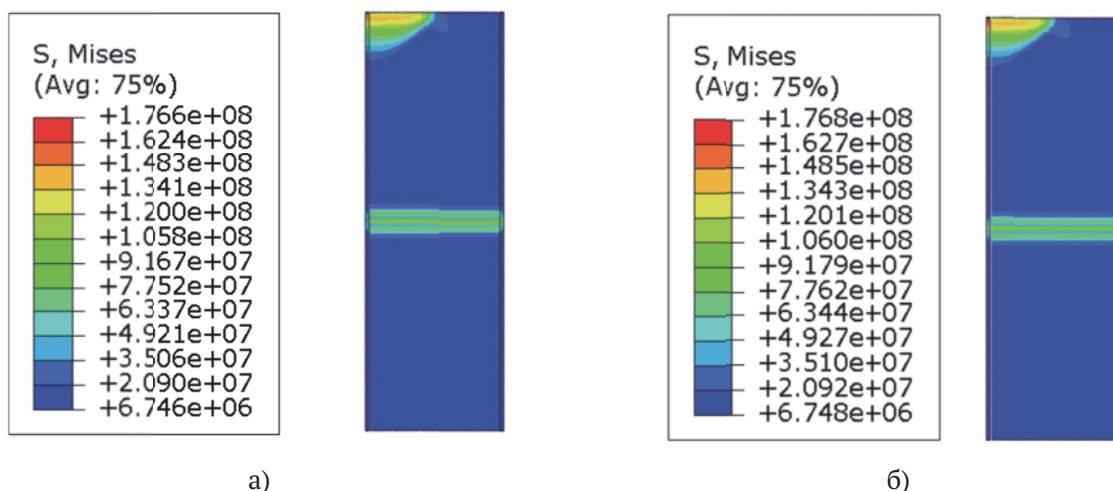


Рисунок 2 – Напряжение по Мизесу, Па (в разрезе):

(а) пластырь без дополнительного армирования; (б) пластырь с дополнительным армированием нитинолом

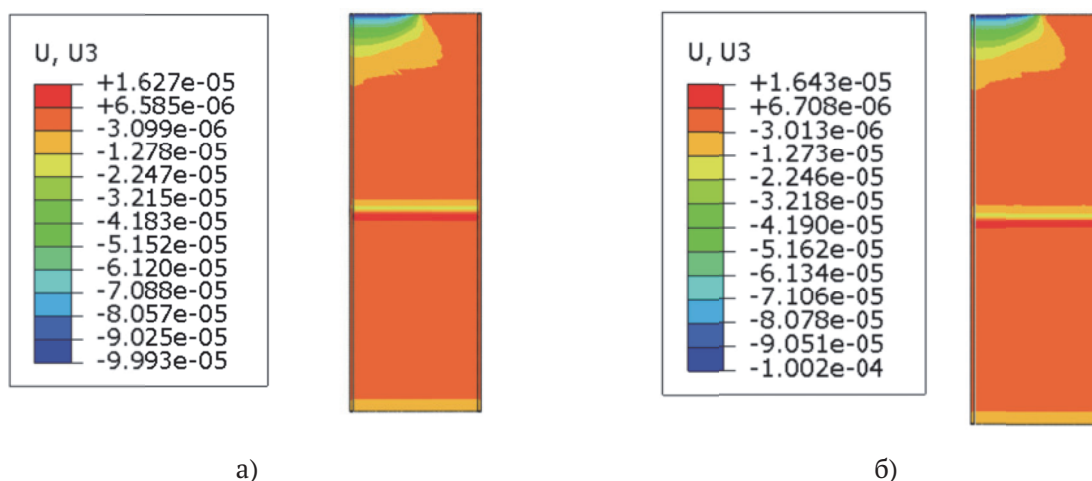


Рисунок 3 – Вертикальные перемещения, м (в разрезе):

(а) пластырь без дополнительного армирования; (б) пластырь с дополнительным армированием нитинолом

сти пластыря, за исключением зоны кольцевой несплошности; отсутствие превышения пределов прочности материалов конструкции; локализация осевых перемещений вблизи области торцевого нагружения без влияния на зону дефекта. Дополнительно армирование нитиноловой сеткой не оказывает существенного влияния на напряженно-деформированное состояние конструкции и, следовательно, не является необходимым.

Физическое моделирование работы пластыря

Внешний вид прототипа пластыря из ТРЕЕ для ликвидации НЭК, разработанная форма для предварительной деформации, и вид прототипа в преддеформированном состоянии приведен на рисунке 4.

После предварительной деформации макет помещался в патрубок, имитирующий эксплуатационную колонну (рисунок 5 (а)), и нагревался. Внешний вид пластыря в патрубке после нагрева приведен на рисунке 5 (б).

В результате определено, что прототип пластыря при восстановлении его формы путем нагрева самостоятельно расширился и плотно прижался к внутренней стенке патрубка, что доказывает принципиальную работоспособность данного решения.

Оценка эксплуатационных свойств пластыря

Для оценки эксплуатационных свойств провели исследования по стойкости потенциального материала пластыря с ЭПФ для ликвидации НЭК к типовым внутрискважинным условиям. В результате декомпрессионного сброса давления на образце-лопатке обнаружено единичное вздутие в уширение образца (рисунок 6 (а)). На образце-квадрате изменения отсутствовали. При этом отмечено общее снижение блеска из-за возможного осаждения продуктов коррозии стенки автоклава. В водной среде под давлением образцы были склонны к сорбции среды, что дополнительно выражалось в незначительном росте размеров и небольшом снижении твердости. После сушки параметры

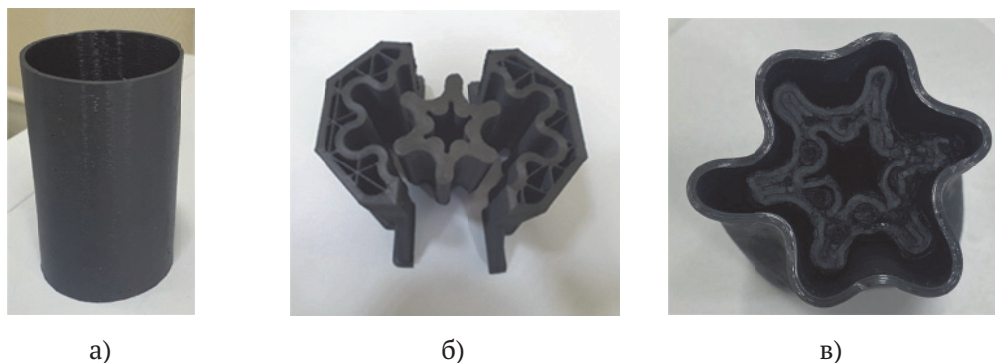


Рисунок 4 – Внешний вид прототипа после печати (а); форма для предварительной деформации (б) и внешний вид прототипа в преддеформированном состоянии (в)

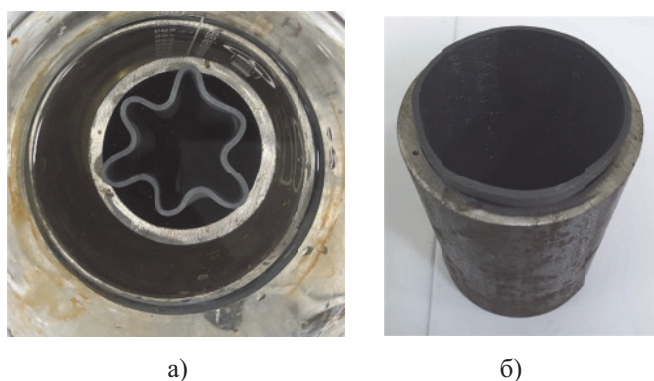


Рисунок 5 – Размещение предварительно деформированного прототипа в патрубок для нагрева (а); внешний вид прототипа после его нагрева (б)

вернулись в исходное значение, однако образец-квадрат обладал незначительной потерей в массе, что могло быть связано с растворением его компонентов в среде в процессе испытаний. Предел прочности материала составил 11 МПа, а величина относительного удлинения ~970%, что свидетельствует об отсутствии вздутий в рабочей зоне образца. Излом сечения был вязким, в котором различались границы волокон (рисунок 6 (б)).

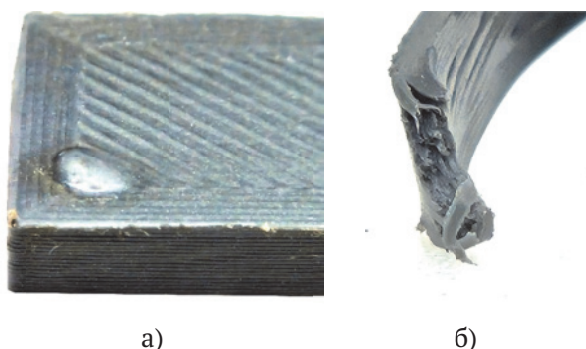


Рисунок 6 – Вздутие в уширении лопатки ТРЕЕ после декомпрессионных испытаний (а); излом лопатки после испытаний на декомпрессию и растяжения (б)

При оценке к химической стойкости в растворе HCl установлено, что Цвет образца приобрёл матовый оттенок в результате старения материала. Причиной потери блеска являлось растрескивание поверхности (рисунок 7).

Образцы после выдержки имели незначительный прирост по массе с переходом в потерю после сушки, что могло быть связано с растворением компонентов в среде в процессе выдержки. Предел прочности, аналогично образцу после декомпрессионных испытаний, составлял 11 МПа. Ввиду технических ограничений разрывной машины разрушения образца в процессе растяжения не произошло из-за чего истинная величина относительного удлинения материала может составлять >970%. В процессе растяжения у образца происходило раскрытие поверхностных трещин, что привело к росту шероховатости в зоне растяжения и дополнительно подтверждает старение материала в процессе выдержки.

**Рисунок 7** – Внешний вид ТРЕЕ после выдержки в растворе кислоты

В результате определения химической стойкости в имитаторе нефтепродуктов определено, что материал склонен к сорбции углеводородов с соответствующим значительным изменением в размерах и снижению твёрдости. Образец приобрёл выпуклую форму. Однако поверхностных дефектов по типу трещин и пор не обнаружено. После сушки общий прирост массы образца и его размеры всё ещё оставались положительными указывая на присутствие сорбированной среды. Обобщенные результаты по проведенным исследованиям оценки эксплуатационных свойств приведены в таблице 2.

Таблица 2. Обобщенные результаты по проведенным исследованиям оценки эксплуатационных свойств ТРЕЕ

Образец	Изменение				Предел прочности, МПа	Относительное удлинение при растяжении, %
	Масса, % выдержка / сушка	Размер, % выдержка / сушка	Твёрдость, % выдержка / сушка	Внешний вид		
Декомпрессионный сброс давления						
Лопатка	5,8 / 0,0	-	-3 / 0	Вздутие не в рабочей части	11	970
Квадрат	4,1 / -0,1	1,7 / -0,9	-4 / 0	Без изменений	-	-
Выдержка в растворе HCl						
Лопатка	0,3 / -0,1	-	0 / 0	Потеря блеска / поверхностно растрескивание	11	>970
Квадрат	0,3 / -0,1	0,1 / -0,2	0 / 0		-	-
Выдержка в имитаторе нефтепродуктов						
Квадрат	41,5 / 4,2	31 / 3,8	-14 / -4	Увеличение размера, появление кривизны после выдержки	-	-

Таким образом, установлено, что опытный материал обладает высокой стойкостью к декомпрессии в водном растворе и химической стойкостью к 20% водному раствору HCl. При этом в условиях контакта с углеводородами материал проявил высокую сорбцию с одновременным снижением твёрдости. Таким образом, необходимы дополнительные исследования по подбору материала пластины для ликвидации НЭК, обладающего более высокой стойкостью к различным средам, содержащие углеводороды.

ВЫВОДЫ

В ходе проведения настоящей работы оценили применимость полимеров с эффектом памяти формы для изготовления устройства, предназначенного для ликвидации несплошности эксплуатационной колонны, и сделали следующие выводы:

Методами математического моделирования показана возможность применения полимерного материала с ЭПФ, армированного углеволокном для производства пластыря с целью ликвидации НЭК. Установлено, что данное решение соответствует требованиям нефтегазовой компании и выдерживает внешнюю нагрузку в 120 атмосфер и нагрузку на торец пластыря 117 кН.

Методами физического моделирования показана принципиальная применимость полимеров с эффектом памяти формы для производства пластыря с целью ликвидации НЭК.

В результате оценки эксплуатационных свойств полимера с ЭПФ установлено, что опытный материал обладает высокой стойкостью к декомпрессии в водном растворе и химической стойкостью к 20% водному раствору HCl. При этом в условиях контакта с углеводородами материал проявил высокую сорбцию с массовым поглощением на ~42% и соответствующим увеличением размера на ~30% и снижением твердости на ~14%. После сушки общий прирост массы снизился до ~4% с увеличением размера до ~4% и снижением твердости до ~4%. Таким образом, необходимы дополнительные исследования по подбору материала пластыря для ликвидации НЭК, обладающего более высокой стойкостью к различным средам, содержащие углеводороды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кладиев, С.Н. Обзор и критический анализ современного состояния и путей развития технологического процесса добычи нефти электроприводным способом в прерывистых режимах эксплуатации мало-и среднедебитных скважин / С.Н. Кладиев // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – №. 8. – С. 220-231.
2. Миловидов, К.Н. Инновационные технологии в зарубежной нефтегазовой отрасли / К.Н. Миловидов // Деловой журнал Neftegaz. ru. – 2021. – №. 8. – С. 42-52.
3. Нечаев, Д.В. Влияние технологии производства на структурное состояние и механические свойства сплава с эффектом памяти формы на основе системы Fe-Mn-Si / Д.В. Нечаев, А.А. Кур, А.А. Альхименко [и др.]. // Металлург. – 2024. – № 10. – С. 62-69.
4. Насирова, Н.Н. Изучение и использование материалов с эффектом памяти формы / Н.Н. Насирова, С.А. Арефьева // Модернизация, инновации, прогресс: передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации - MIP: ENGINEERING-IV-2022. – 2022. – С. 18-24.
5. Веткова, В.Ю. Анализ применения материалов с эффектом памяти формы в промышленности / В.Ю. Веткова // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – №. 12. – С. 230-232.
1. Ишкулов, И.М. О методах определения негерметичности эксплуатационной колонны скважины / И.М. Ишкулов, Р.Р. Вафин, Д.Д. Тахауов // Нефтяное хозяйство. – 2024. – № 7. – С. 56-60.
1. Ibukun M. et al. A review of well life cycle integrity challenges in the oil and gas industry and its implications for sustained casing pressure (SCP) //Energies. (2024) T. 17. №. 22. С. 5562.
1. Dakhaeva F., Magomaev T. Environmental and economic risks of the oil and gas sector //Reliability: Theory & Applications. (2022) T. 17. №. SI 4 (70). С. 530-536.
1. Pilić V. et al. Innovative approach of damage mechanism identification for energy equipment—A case study of oil refinery // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. (2024) T. 46. №. 1. С. 9389-9403
1. Алексеева, Н.А. Повышение эффективности подземных ремонтных работ на нефтегазовых скважинах на примере ООО «ПЕТРОЛ-УРАЛ» / Н.А. Алексеева, С.А. Доронина // Вестник Удмуртского университета. Серия «Экономика и право». – 2024. – Т. 34. – №. 2. – С. 191-197.
1. Кадыров, Р.Р. Совершенствование технологий проведения ремонтно-изоляционных работ на скважинах: монография / Р.Р. Кадыров, Э.Ф. Велиев, А.Р. Сафиуллина. – Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. – 114 с.
1. Шемчук В.В. Оценка экономической эффективности проекта мероприятий по оптимизации работ при капитальном ремонте скважин / // Фундаментальная и прикладная наука: состояние и тенденции развития. – 2021. – С. 67-73.
1. Насыров, А.М. Освоение и глушение нефтяных скважин: учебное пособие / А.М. Насыров, С.Ю. Борхович, О.Н. Барданова. – М. - Вологда : Инфа-Инженерия, 2022. – 264 с.
14. Гусев, Д.Е. Влияние механизмов формоизменения на характеристики эффекта памяти формы композиционного материала полиамид 66-никелид титана / Д.Е. Гусев, М.Ю. Коллеров, Е.А. Лукина // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т. 25. – №. 2. – С. 56-66.
15. Ren Z. et al. Manufacture and investigation on the shape memory polymer composite subsidy pipe //Composite Structures. (2021) T. 274. С. 114331.

ASSESSMENT OF THE APPLICABILITY OF SHAPE MEMORY POLYMERS FOR THE MANUFACTURING OF A DEVICE TO ELIMINATE DISCONTINUITY IN A PRODUCTION COLUMN

© 2025 S.B. Ermakov¹, D.V. Nechaev², V.N. Khashba², P.E. Kruk², V.D. Manuilov³

¹Tyumen Industrial University, Tyumen, Russia

²Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

³NEO ENGINEERING LLC, St. Petersburg, Russia

In this study, we demonstrated the fundamental feasibility of using shape-memory polymers to fabricate a device designed to repair discontinuities in a production casing using physical and mathematical modeling. It was determined that additional reinforcement with a nitinol mesh does not significantly affect the stress-strain state of the structure and is therefore unnecessary. The experimental thermoplastic polymer with shape-memory effect was shown to exhibit high resistance to decompression in an aqueous solution and chemical resistance to a 20% aqueous HCl solution. However, further research is needed to select a material with higher resistance to various hydrocarbons.

Key words: shape memory effect, discontinuity of the production casing, polymer, reinforcement, mathematical modeling, operational properties.

DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3(2)-331-338

EDN: TQBHTO

This study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment «Development of a comprehensive model for the reliability, operability, and key quality indicators of pipeline systems for northern use» (FEWN-2025–0001)

REFERENCES

1. Kladiev, S.N. Obzor i kriticheskij analiz sovremennogo sostoyaniya i putej razvitiya tekhnologicheskogo processa dobychi nefi elektropriwodnym sposobom v preryvistykh rezhimakh ekspluatacii malo-i srednedebitnykh skvazhin / S.N. Kladiev // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2023. – T. 334. – №. 8. – S. 220-231.
2. Milovidov, K.N. Innovacionnye tekhnologii v zarubezhnoj neftegazovoj otrasli / K.N. Milovidov // Delovoj zhurnal Neftegaz. ru. – 2021. – №. 8. – S. 42-52.
3. Nechaev, D.V. Vliyanie tekhnologii proizvodstva na strukturnoe sostoyanie i mekhanicheskie svoystva splava s efektom pamyati formy na osnove sistemy Fe-Mn-Si / D.V. Nechaev, A.A. Kur, A.A. Al'himenko [i dr.]. // Metallurg. – 2024. – №. 10. – S. 62-69.
4. Nasirova, N.N. Izuchenie i ispol'zovanie materialov s efektom pamyati formy / N.N. Nasirova, S.A. Aref'eva // Modernizatsiya, innovatsii, progress: peredovye tekhnologii v materialovedenii, mashinostroenii i avtomatizatsii - MIP: ENGINEERING-IV-2022. – 2022. – S. 18-24.
5. Vetkova, V.Yu. Analiz primeneniya materialov s efektom pamyati formy v promyshlennosti / V.Yu. Vetkova // Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2024. – №. 12. – S. 230-232.
6. Ishkulov, I.M. O metodahopredeleniya negermetichnosti ekspluatacionnoj kolonny skvazhiny / I.M. Ishkulov, R.R. Vafin, D.D. Tahauov // Neftyanoe hozyajstvo. – 2024. – №. 7. – S. 56-60.
7. Ibukun M. et al. A review of well life cycle integrity challenges in the oil and gas industry and its implications for sustained casing pressure (SCP) // Energies. (2024) T. 17. №. 22. S. 5562.
8. Dakhaeva F., Magomaev T. Environmental and economic risks of the oil and gas sector // Reliability: Theory & Applications. (2022) T. 17. №. SI 4 (70). S. 530-536.
9. Pilić V. et al. Innovative approach of damage mechanism identification for energy equipment—A case study of oil refinery // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. (2024) T. 46. №. 1. S. 9389-9403
10. Alekseeva, N.A. Povyshenie effektivnosti podzemnykh remontnykh rabot na neftegazovykh skvazhinah na primere OOO «PETROL-URAL» / N.A. Alekseeva, S.A. Doronina // Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya «Ekonomika i pravo». – 2024. – T. 34. – №. 2. – S. 191-197.
11. Kadyrov, R.R. Sovershenstvovanie tekhnologij provedeniya remontno-izolyacionnykh rabot na skvazhinah: monografiya / R.R. Kadyrov, E.F. Veliev, A.R. Safiullina. – Ufa: Izd-vo UGNTU, 2022. – 114 s.
12. Shemchuk V.V. Ocenka ekonomicheskoy effektivnosti proekta meropriyatij po optimizatsii rabot pri kapital'nom remonte skvazhin // Fundamental'naya i prikladnaya nauka: sostoyanie i tendentsii razvitiya. – 2021. – S. 67-73.
13. Nasyrov, A.M. Osvoenie i glushenie neftyanykh skvazhin: uchebnoe posobie / A.M. Nasyrov, S.Yu. Borhovich, O.N. Bardanova. – M. - Vologda : Infa-Inzheneriya, 2022. – 264 s.
14. Gusev, D.E. Vliyanie mekhanizmov formoizmeneniya na harakteristiki efekta pamyati formy kompozitsionnogo materiala poliamid 66-nikelid titana / D.E. Gusev, M.Yu. Kollerov, E.A. Lukina // Fizicheskaya mezomekhanika. – 2022. – T. 25. – №. 2. – S. 56-66.
15. Ren Z. et al. Manufacture and investigation on the shape memory polymer composite subsidy pipe // Composite Structures. (2021) T. 274. S. 114331.

Sergey Ermakov, Candidate of Technical Sciences, Director of the Center for Technological Initiatives. E-mail: ermakov_sb@spbstu.ru

Daniil Nechaev, Research Engineer, Materials Resources Laboratory. E-mail: nechaev_dv@spbstu.ru

Valeria Khashba, Research Associate, Virtual Simulation Modeling Research Laboratory. E-mail: hashba_vn@spbstu.ru

Pavel Kruk, Research Engineer, New Technologies and Materials Scientific and Technological Complex. E-mail: kruk_pe@spbstu.ru

Vladimir Manuilov, General Director.