ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ В НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

OPPORTUNITIES FOR USING INNOVATIVE SHAPE MEMORY EFFECT MATERIALS IN OIL INDUSTRY

Р. В. Агине́й
Ruslan V. Aghiney

АО «Гипрогазцентр»,
г. Нижний Новгород,
Российская Федерация

Giprogahtsentr JSC,
Nizhny Novgorod,
Russian Federation

В. О. Некучаев
Vladimir O. Nekuchaev

Ухтинский государственный
технический университет,
г. Ухта, Российская Федерация

Ukhta State Technical University,
Ukhta, Russian Federation

Е. В. Семиткина
Ekaterina V. Semitkina

Ухтинский государственный
технический университет,
г. Ухта, Российская Федерация

Ukhta State Technical University,
Ukhta, Russian Federation

М. В. Терентьева
Marina V. Terentyeva

Ухтинский государственный
технический университет,
г. Ухта, Российская Федерация

Ukhta State Technical University,
Ukhta, Russian Federation

Открытие эффекта памяти формы (ЭПФ) в области физики металлов послужило началом для большого этапа исследований новых материалов, обладающих специфическими свойствами.

Никелид титана (NiTi) известен как сплав, проявляющий большой по величине эффект памяти формы и одновременно обладающий хорошей прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. Практическое применение данных материалов в различных устройствах началось только в семидесятих годах прошлого столетия.

Настоящая работа посвящена исследованию возможности применения материалов с ЭПФ для решения частных задач в нефтегазовом комплексе (НГК), включая применение материалов ЭПФ в качестве соединительных элементов трубопроводов и арматурных стержней для фундаментов крупногабаритных конструкций, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях. Данные предложения позволят обеспечить значительный запас прочности рассматриваемых объектов НГК и их безопасную эксплуатацию.

Выполнен анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных применению материалов с ЭПФ в различных сферах нефтегазовой отрасли. Приведены сведения об основных физических, механических и функциональных свойствах сплавов с ЭПФ. Выполнено теоретическое обоснование эффективности применения материалов с ЭПФ в качестве муфтовых соединительных элементов для промысловых трубопроводов как альтернатива огнеопасным сварочным работам на предприятиях повышенной пожароопасности, а также применение преднапряженной арматуры из сплавов с ЭПФ для конструкции плитных фундаментов крупногабаритных резервуаров для углеводородов взамен традиционного армирования. Расчет напряжений и деформаций в программной среде ANSYS показал высокую потенциальную эффективность применения технологии ЭПФ для реализации описанных задач.

Ключевые слова

память формы; никелид титана;
соединительная муфта;
армирование бетона

The discovery of the shape memory effect (SME) in the field of metal physics was the beginning of a large stage of research on new materials with specific properties.

Titanium nickelide (NiTi) is known as an alloy that exhibits a large-size shape memory effect and at the same time has good strength, ductility and corrosion resistance.

The practical application of these materials in various devices began only in the seventies of the last century.

This paper is devoted to the study of the possibility of using SME materials for solving particular problems in the oil and gas industry, including the use of the SME materials as connecting elements for pipelines and reinforcing bars for foundations of large-sized structures used in difficult engineering and geological conditions. These proposals will ensure a significant margin of safety for the oil and gas facilities under consideration and their safe operation.

The analysis of domestic and foreign works on the use of SME materials in various areas of the oil and gas industry is fulfilled. Information on the basic physical, mechanical, and functional properties of SME alloys is given. The theoretical substantiation of the effective use of SME materials as sleeve couplings for field pipelines as an alternative to flammable welding at fire hazard enterprises, as well as the use of prestressed reinforcement SME alloys for the construction of plate foundations for large hydrocarbon reservoirs instead of traditional reinforcement, has been carried out. Calculation of stresses and strains in the ANSYS software environment has shown the high potential effectiveness of applying the SME technology to implement the described tasks.

Быстрые темпы развития производственной деятельности человека вызывают необходимость в создании и изучении новых материалов.

Еще в прошлом столетии советские металлофизики Г.В. Курдюмов и Л.Г. Хандорсон предложили сплав, наделенный способностью к формовосстановлению после значительных пластических деформаций при нагреве до определенной температуры. Это изобретение было признано открытием и стало известно, как эффект Курдюмова, или эффект памяти формы (ЭПФ).

Во второй половине двадцатого столетия впервые был получен сплав с эффектом памяти формы — нитинол. Никелид титана (NiTi) известен как сплав, проявляющий большой по величине эффект памяти формы и одновременно обладающий хорошей прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью. Функциональные свойства никелида титана связаны с термоупругими мартенситными превращениями.

На рисунке 1 представлена инфографика ЭПФ: показано накопление деформации при охлаждении и восстановлении при нагреве в сплаве с ЭПФ в ненагруженном состоянии после предварительного термоциклирования под нагрузкой через интервал M_k – A_k , также

отображены кристаллические структуры мартенсита и аустенита.

Сплавы с ЭПФ демонстрируют сложное трехмерное термомеханическое поведение с гистерезисом, определяемое большим количеством параметров (температура, реактивные напряжения, деформация памяти и т.д.). Для проявления многократного эффекта и перехода в деформированное состояние необходимо приложение внешних нагрузок.

В таблице 1 приведены основные типы металлургических систем, в которых проявляется ЭПФ [1], в таблице 2 дана сравнительная характеристика параметров никелида титана и стали. Из анализа данных таблицы 2 видно, что никелид титана обладает исключительными физико-механическими характеристиками (высокой прочностью на растяжение и сжатие и модулем упругости, меньше чем у стали).

По настоящее время этот сплав и другие сплавы, проявляющие ЭПФ, интенсивно исследуются и в ряде случаев успешно применяются в технике, позволяя создавать элементы и устройства с принципиально новыми функциональными свойствами [2–4].

Практическое применение данных материалов в различных устройствах началось только в семидесятых годах прошлого столетия.

Key words

shape memory; titanium nickelide; coupling; concrete reinforcement

Рисунок 1. Инфографика ЭПФ

Таблица 1. Сплавы с эффектом памяти формы [1]

Сплав	Концентрации элементов в сплаве	Температурный диапазон превращения, °C	Гистерезис, °C
Ag-Cd	44/49 ат. % Cd	-190 ÷ -50	≈ 15
Au-Cd	46.5/50 ат. % Cd	30 ÷ 100	≈ 15
Cu-Al-Ni	14/14.5 в. % Al, 3/4.5 в. % Ni	-140 ÷ 100	≈ 35
Cu-Sn	≈ 15 ат. % Sn	-120 ÷ 30	—
Cu-Zn	38.5/41.5 в. % Zn	-180 ÷ -10	≈ 10
CuZn-X (X=Si, Sn, Al)	неск. в. % X	-180 ÷ 200	≈ 10
In-Ti	18/23 ат. % Ti	60 ÷ 100	≈ 4
Ni-Al	36/38 ат. % Al	-180 ÷ 100	≈ 10
Ni-Ti (нитинол)	49/51 ат. % Ni	-200 ÷ 110	≈ 30
TiNi-Fe	3 ат. % Fe	-180 ÷ 100	≈ 10
TiNi-Cu	≈ 8-20 ат. % Cu	-150 ÷ 100	≈ 50 ÷ 4
TiNi-Nb	≈ 9-15 ат. % Nb	-200 ÷ 50	66–125
TiNi-Au	50 ат. % Ni+Au	20 ÷ 610	—
TiNi-Pd, Pt	50 ат. % Ni+5,5 ат. % Pd, Pt	-200 ÷ 700	≈ 30 ÷ 100
Fe-Pt	≈ 25 ат. % Pt	≈ -130	≈ 4
Mn-Cu	5/35 ат. % Cu	-250 ÷ 180	≈ 25
Fe-Mn-Si	32 в. % Mn, 6 в. % Si	-200 ÷ 150	≈ 100

Таблица 2. Основные характеристики TiNi и стали [5, 6]

Параметры	NiTi	Строительная сталь ГОСТ 27772-2015
Плотность, г/см ³	6,45–6,50	7,85
Температура плавления, °C	1250–1310	1450–1520
Коэффициент температурного расширения, 10 ⁻⁶ , K ⁻¹	12–14	11,9
Удельное электросопротивление, 10 ⁻⁸ , Ом•м	70–80	17,1
Коэффициент Пуассона	0,33	0,24–0,28
Предел прочности (временное сопротивление разрыву), МПа	800–1000	590
Предел текучести, МПа	400–700	390
Относительное удлинение, %	20–40	14
Модуль упругости, ГПа	70	200

Этот материал был использован для изготовления муфты для соединения трубопроводов гидросистем воздушных судов [2, 5, 6]; также материал применялся для изготовления стопора для неподвижного соединения деталей; еще одно применение в качестве зажимного приспособления для крепления неподвижных деталей типа скоб или уплотнений.

Широкое внедрение сплавов с ЭПФ в машиностроении ограничивается, прежде всего, экономическими соображениями. Экономическая целесообразность использования этих сплавов в машиностроении может быть достигнута за счет использования многокомпонентных сплавов с ЭПФ и многослойных поверхностных слоев с ЭПФ, каждый слой которой имеет свое функциональное назначение [7].

Известно, что титан и его сплавы целесообразно применять для изготовления оборудования, подверженного действию коррозии. Таким образом, применение сплавов титана в ряде случаев целесообразно для изготовления технологических элементов, контактирующих с нефтяными эмульсиями, содержащими коррозионно-активные соединения, например сероводород или двуокись углерода [8].

Учитывая быстроразвивающиеся технологии нефтегазового комплекса (НГК) и возрастающую потребность в новых материалах, в настоящей работе поставлена цель — исследовать возможности применения рассматриваемых материалов с ЭПФ для решения частных задач в НГК, включая применение материалов с ЭПФ в качестве соединительных элементов трубопроводов и арматурных стержней для фундаментов крупногабаритных конструкций, эксплуатируемых в сложных инженерно-геологических условиях. Данные предложения позволят обеспечить значительный запас прочности рассматриваемых объектов НГК и их безопасную эксплуатацию.

Применение материалов с ЭПФ в качестве соединительных муфт трубопроводов

Альтернативным решением соединения промышленных трубопроводов на нефтяных и нефтегазовых месторождениях, обладающим значительными преимуществами над традиционной технологией сварки, является применение соединительных муфт из материалов с ЭПФ [9].

Совокупность всех факторов технологического режима работы оборудования на промысловых трубопроводных системах (высокое давление, расход технологических жидко-

стей потока, коррозионная активность перекачиваемого продукта) приводит к повреждению и дальнейшему разрушению сварных соединений, к выходу из строя оборудования, разрушительному влиянию на экологию и дальнейшим финансовым затратам, учитывая трудоемкость сварки металлических трубопроводов высокого давления.

Сварное соединение всегда было «слабым» звеном в составе трубопровода, что обусловлено высоким риском получения дефектов в таком соединении, влиянием температуры и образованием структур в металле, отличных от тех, которые присутствуют в основном металле труб, наличием коррозионных гальванопар вследствие образования разнородных зон поверхности металла. Практика показывает, что даже обеспечить пластические свойства металла труб, определяемые при испытании образцов со сварным швом, не простая задача.

Поэтому создание технологии и конструкции, способных решить проблему коррозионного разрушения сварных соединений при наличии перечисленных факторов, а также обеспечивающих надежность соединения, является актуальной задачей.

Одним из новых ресурсосберегающих направлений обеспечения безопасной эксплуатации трубопроводов и повышения их долговечности является разработка быстросрабатываемого функционального устройства для соединения промышленного оборудования, не подверженного коррозии, позволяющего увеличить срок эксплуатации промысловых систем.

Для решения обозначенной задачи разработан и исследован вид конструкционного соединения, представляющий собой муфту из материала с эффектом памяти формы [9] (рисунки 2).

Рисунок 2. Общий вид конструкций муфты

Разработанное соединение функционально совместимо с трубами и запорной арматурой сортамента, действующего на нефтяных промыслах.

Для формирования ЭПФ заданной величины наиболее эффективным является способ обработки полуфабрикатов из сплавов с термупругими мартенситными превращениями, предложенный в [10], где требуемые деформационные свойства задаются путем охлаждения изделия под нагрузкой и нагрева в разгруженном состоянии.

Для определения механических напряжений в муфте и соединяемых участках труб

проведено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния неразъемного конструкционного соединения с ЭПФ в интерфейсе ANSYS с учетом внутреннего и внешнего давлений, пространственных привязок модели и напряжений, возникающих в зоне контакта муфты и тела трубопровода.

Визуализация конечно-элементной сетки, которая является математическим представлением геометрической модели, представлена на рисунке 3. Результаты компьютерного моделирования муфты с учетом условий эксплуатации показаны на рисунке 3.

Рисунок 3. Пример конечно-элементного разбиения конструкции и результаты расчета напряжений (Па) в муфте и соединяемых трубопроводах [11]

Исходя из полученных данных ANSYS видно, что максимальные напряжения, найденные при помощи метода конечных элементов, возникают по ободу муфты, минимальные — по трубе и патрубку задвижки, числовые значения превышают значения внутреннего давления (15 МПа), но не превышают пределы прочности, текучести материалов, что говорит о сохранении целостности и прочности конструкции, а значит, разрабатываемая модель муфты сможет обеспечить герметичность соединения для рабочего давления и будет надежна в эксплуатации.

Применение материалов с ЭПФ для упрочнения фундаментов стальных вертикальных резервуаров

Развитие нефтегазовых регионов Крайнего Севера сопровождается необходимостью строительства крупногабаритных резервуаров на грунтах со слабой несущей способностью.

Опыт сооружения резервуаров показывает, что при проектировании и строительстве вер-

тикальных стальных резервуаров (РВС) на слабонесущих грунтах приходится решать задачи по обеспечению устойчивости оснований и прочности фундаментных конструкций, которые находятся под действием эксплуатационных нагрузок, снижению неравномерных осадок и прогибов фундаментов.

Из данных статистического анализа причин аварий резервуаров [12] установлено, что 46 % всех аварий РВС вызваны неравномерными осадками основания (таблица 3).

В качестве фундаментной конструкции, передающей нагрузку от сооружения на основание, используются преимущественно три типа фундамента для РВС: сплошные железобетонные плиты, кольцевой и свайный фундаменты. Для снижения стоимости строительства РВС чаще всего применяют плитный фундамент, а трудоемкий свайный проектируют тогда, когда расчетные деформации основания плиты превосходят предельно допустимые показатели.

Таблица 3. Доминирующие причины аварий РВС [12]

Причины	Статистика, %
Недопустимо большие и неравномерные осадки РВС	46
Наличие концентраторов напряжений из-за несовершенства конструкции РВС	21
Аварии, связанные с заклиниванием и обрушением крыш РВС	18
Наличие дефектов в материале и конструкции РВС	9
Нарушение технологии изготовления РВС	5
Грубые ошибки в аналитических расчетах и проектировании резервуара	1

Известно [13], что, приложив равномерную нагрузку к гибкой железобетонной фундаментной плите, грунтовое основание под центром даст осадку большую, чем под краем (рисунок 4).

Плита перемещается совместно с основанием, сопротивляясь неравномерным осадкам, что является причиной возникновения внутренних напряжений и прогибов, превышающих допустимые значения, приводящие к растрескиванию плиты и разрушению надземной конструкции. Как правило, это решается повышением жесткости фундаментной конструкции (упрочнение фундамента) или несущей способности слабого основания (укрепление грунтов).

С целью снижения неравномерной осадки основания и прогибов плитных фундаментов нефтяных резервуаров научно обоснована идея упрочнения фундаментных конструкций путем внедрения преднапряженных арматурных стержней из сплавов с эффектом памяти формы взамен традиционной технологии [14]. Эффективность плитных фундаментов с арматурой из сплавов с эффектом памяти обусловлена уменьшением прогибов в фундаменте, повышением трещиностойкости самой плиты и снижением усилий в надземных конструкциях от неравномерных осадок основания. При этом сохраняются конструктивная простота и технологичность возведения, характерные для фундаментов традиционных форм [13].

Несмотря на нетривиальные свойства ЭПФ, на сегодняшний день в строительном проектировании и производстве отсутствуют стандартизированные методики расчета и технологии их применения в качестве элементов, воспринимающих нагрузки в сечениях конструкций [14].

Для теоретического обоснования предлагаемой технологии выполнен расчет модели армированного фундамента нефтяного резервуара РВС-20000, расположенного на слабонесущих грунтах. Для данных конструкций в качестве армирующих элементов рекомендуется применять стержни из материалов с ЭПФ, а именно сплав никелида титана ТН-1К.

Расчет выполнен с учетом силового взаимодействия «днище резервуара — фундамент — грунтовое основание» в программном комплексе ANSYS (платформа Workbench). Модель подвергалась воздействию эксплуатационных нагрузок по СП 20.13330.2011. Расчет выполнен для двух вариантов плитного фундамента РВС: 1) монолитная железобетонная фундаментная плита, армированная преднапряженными стальными стержнями класса АПШØ14 мм; 2) монолитная железобетонная фундаментная плита, армированная преднапряженными стержнями из сплава с ЭПФ — никелид титана Ø 14 мм. Шаг арматурной сетки принят 300 × 300 мм в обоих вариантах. Результаты представлены на рисунке 5.

Рисунок 4. Влияние неравномерных реактивных давлений и осадок на плитный фундамент РВС

а) РВС-20000 на плите с преднапряженной стальной арматурой; б) РВС-20000 на плите с преднапряженной арматурой из ЭПФ
Рисунок 5. Расчетные деформации в паре «плитный фундамент — грунтовое основание»

Полученные результаты осадки основания резервуара и прогибов плитного фундамента по двум вариантам армирования плиты сравнены с нормами согласно СП 22.13330.2011 [15].

При варианте армирования плиты стержнями с ЭПФ возникают незначительные неравномерные осадки и прогибы плиты, которые не превышают значений согласно СП 22.13330.2011.

Очевидно, что деформация пары «плитный фундамент — грунтовое основание» зависит от жесткости плиты резервуара и основания (грунта), на котором размещена конструкция. Поэтому задача повышения устойчивости резервуаров может быть эффективно решена совместно упрочнением основания и созданием достаточной жесткости конструкции плиты. Одним из таких решений и является предложенная модель армирования материалами с эффектом памяти, имеющими более высокие прочностные характеристики по сравнению со стальными арматурными стержнями.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ооцука К., Симидзу К., Судзуки Ю. Сплавы с эффектом памяти формы. М.: Металлургия, 1990. 224 с.
2. Шишкин С.В., Махутов Н.А. Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы. М.-Ижевск: НИЦ R&C Dynamics, 2007. 456 с.
3. Volkov A.E., Belyaev F.S., Evard M.E., Volkova N.A. Model of the Evolution of Deformation Defects and Irreversible Strain at Thermal Cycling of Stressed TiNi Alloy Specimen // MATEC Web of Conferences. 2015. Vol. 33. No. 5. P. 1–5.

Выводы

1. Выполнен анализ отечественных и зарубежных работ, посвященных применению материалов с ЭПФ в различных сферах нефтегазовой отрасли.
2. Приведены сведения об основных физических, механических и функциональных свойствах сплавов с ЭПФ.
3. Выполнено теоретическое обоснование эффективности применения материалов с ЭПФ в качестве муфтовых соединительных элементов для промышленных трубопроводов как альтернатива огнеопасным сварочным работам на предприятиях повышенной пожароопасности, а также применения преднапряженной арматуры из сплавов с ЭПФ для конструкции плитных фундаментов крупногабаритных резервуаров для углеводородов взамен традиционного армирования.
4. Расчет напряжений и деформаций в программной среде ANSYS показал высокую потенциальную эффективность применения технологии ЭПФ для реализации описанных задач.

4. Debbarma S.R., Saha S. Review of Shape Memory Alloys Applications in Civil Structures, and Analysis for its Potential as Reinforcement in Concrete Flexural Members // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2013. Vol. 4. Issue 1. P. 924–942.
5. Бледнова Ж.М., Степаненко М.А. Роль сплавов с эффектом памяти формы в современном машиностроении. Краснодар: Изд-во КубГТУ, 2012. 69 с.
6. Беляев С.П., Волков А.Е., Ермолаев В.А., Каменцева З.П., Кузьмин С.Л., Лихачев В.А., Мозгунов В.Ф., Разов А.И., Хайров Р.Ю. Материалы с эффектом памяти формы. Т. 1. СПб.: Изд-во НИИХ СПбГУ, 1998. 374 с.

7. Бледнова Ж.М., Махутов Н.А., Русинов П.О., Степаненко М.А. Механические и трибологические свойства многофункциональной композиции «основа — материал с эффектом памяти формы» // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 3. С. 41–49.

8. Li S., Dezhi L., Qianqian G., Jianhong Z. Analysis on Factors Affecting the Self-Repair Capability of SMA Wire Concrete Beam // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering. 2013. Vol. 2013. P. 1–9.

9. Андронов И.Н., Семиткина Е.В., Применение муфты переменного диаметра из материала с памятью в качестве соединительного элемента на промышленных трубопроводах // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2017. № 11. С. 20–27.

10. Пат. 2619578 РФ, МПК Е 04 G 21/12. Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции / И.Н. Андронов, С.Н. Беляев, Н.С. Майорова, Е.В. Семиткина, М.В. Терентьева. 2015146788, Заявлено 29.10.2015; Оpubл. 16.05.2017. Бюл. № 14.

11. Андронов И.Н., Семиткина Е.В., Компьютерное моделирование НДС неразъемного конструкционного соединения с эффектом памяти формы в интерфейсе ANSYS // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 6. С. 47–52. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-6-47-52.

12. Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н., Землянский А.А., Тарасенко А.А. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2009. 336 с.

13. Андронов И.Н., Терентьева М.В. Разработка надежной преднапряженной конструкции фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов в сложных инженерно-геологических условиях // Нефтегазовое дело. 2016. № 1. С. 123–129.

14. Андронов И.Н., Терентьева М.В. Проектно-расчетный расчет упрочнения резервуаров сжиженного природного газа путем армирования стержнями из материалов с памятью // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2017. № 6. С. 32–37.

15. Андронов И.Н., Терентьева М.В. Компьютерное моделирование конструкции плитного фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов с использованием арматуры из материалов с памятью // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2018. № 3. С. 46–54. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-3-46-54.

REFERENCES

1. Ootsuka K., Simidzu K., Sudzuki Yu. *Splavy s efektom pamyati formy* [Shape Memory Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1990. 224 p. [in Russian].
2. Shishkin S.V., Makhutov N.A. *Raschet i projektirovanie silovykh konstrukttsii na splavakh s efektom pamyati formy* [Calculation and Design of Power Structures on Alloys with Shape Memory Effect]. Moscow-Izhevsk, NITs R&C Dynamics Publ., 2007. 456 p. [in Russian].
3. Volkov A.E., Belyaev F.S., Evard M.E., Volkova N.A. *Model of the Evolution of Deformation Defects and Irreversible Strain at Thermal Cycling of Stressed TiNi*

Alloy Specimen. MATEC Web of Conferences, 2015, Vol. 33, No. 5, pp. 1–5.

4. Debbarma S.R., Saha S. Review of Shape Memory Alloys Applications in Civil Structures, and Analysis for Its Potential as Reinforcement in Concrete Flexural Members. International Journal of Civil Engineering and Technology, 2013, Vol. 4, Issue 1, pp. 924–942.

5. Blednova Zh.M., Stepanenko M.A. Rol splavov s efektom pamyati formy v sovremennom mashinostroenii [The Role of Shape Memory Alloys in Modern Engineering]. Krasnodar, KubGTU Publ., 2012. 69 p. [in Russian].

6. Belyaev S.P., Volkov A.E., Ermolaev V.A., Kamenskaya Z.P., Kuz'min S.L., Likhachev V.A., Mozgunov V.F., Razov A.I., Khairov R.Yu. *Materialy s efektom pamyati formy. T. 1.* [Materials with Shape Memory Effect. Vol. 1]. Saint-Petersburg, NIIKh SPbGU Publ., 1998. 374 p. [in Russian].

7. Blednova Zh.M., Makhutov N.A., Rusinov P.O., Stepanenko M.A. *Mekhanicheskie i tribologicheskie svoystva mnogofunktsional'noi kompozitsii «osnova — material s efektom pamyati formy»* [Mechanical and Tribological Properties of Multifunctional Composition «Matrix — Material with Shape Memory Effect»]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov — Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*, 2015, Vol. 81, No. 3, pp. 41–49. [in Russian].

8. Li S., Dezhi L., Qianqian G., Jianhong Z. Analysis on Factors Affecting the Self-Repair Capability of SMA Wire Concrete Beam. Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering, 2013, Vol. 2013, pp. 1–9.

9. Andronov I.N., Semitkina E.V. *Primenenie mufty peremennogo diametra iz materiala s pamyat'yu v kachestve soedinitel'nogo elementa na promyslovyykh truboprovodakh* [Use of a Variable-Diameter Coupling Manufactured from Some Material with Memory as a Connecting Element on Fields Flowlines] *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on-Land and off-Shore*, 2017, No. 11, pp. 20–27. [in Russian].

10. Andronov I.N., Belyaev S.N., Maiorova N.S., Semitkina E.V., Terent'eva M.V. *Sposob sozdaniya predvaritel'nogo napryazhennogo sostoyaniya v armirovannoi betonnoi konstrukttsii* [Method for Creating a Prestressed State in a Reinforced Concrete Structure]. Patent RF, No. 2619578, 2017. [in Russian].

11. Andronov I.N., Semitkina E.V., *Komp'yuternoe modelirovanie NDS neraz'emnogo konstrukttsionnogo soedineniya s efektom pamyati formy v interfeise ANSYS* [Computer Simulation of the Stressed-Deformed State (SDS) of a One-Piece Construction Connection with the Shape Memory Effect at the «ANSYS» Interface]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on-Land and off-Shore*, 2018, No. 6, pp. 47–52. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-6-47-52 [in Russian].

12. Kononov P.A., Mangushev R.A., Sotnikov S.N., Zemlyanskii A.A., Tarasenko A.A. *Fundamenty stal'nykh rezervuarov i deformatsii ikh osnovanii* [Foundations of Steel Tanks and Deformation of their Bases]. Moscow, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Publ., 2009. 336 p. [in Russian].

13. Andronov I.N., Terent'eva M.V. Razrabotka nadezhnoi prednaryazhennoi konstruktssii fundamenta rezervuara dlya nefi i nefteproduktov v slozhnykh inzhenerno-geologicheskikh usloviyakh [The Development of Reliable Design Prestressed Tank Foundation for Oil and Oil Products in Difficult Engineering — Geological Conditions]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2016, No. 1, pp. 123-129. [in Russian].

14. Andronov I.N., Terent'eva M.V. Proektirovochnyi raschet uprochneniya rezervuarov szhizhennogo prirodnogo gaza putem armirovaniya sterzhnyami iz materialov s pamyat'yu [Engineering Calculation of Strengthening of Liquefied Natural Gas Tanks by Means of their Reinforcement by Rods Made of Materials with Memory].

Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on-Land and off-Shore, 2017, No. 6, pp. 32-37. [in Russian].

15. Andronov I.N., Terent'eva M.V. Komp'yuternoe modelirovanie konstruktssii plitnogo fundamenta rezervuara dlya nefi i nefteproduktov s ispol'zovaniem armatury iz materialov s pamyat'yu [Computer Modeling of a Plate Foundation Construction of an Oil and Oil Products Storage Tank Using Fittings Made of Materials with Memory]. *Stroitel'stvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more — Construction of Oil and Gas Wells on-Land and off-Shore*, 2018, No. 3, pp. 46-54. DOI: 10.30713/0130-3872-2018-3-46-54 [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Агинец Руслан Викторович, д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по науке АО «Гипрогазцентр», г. Нижний Новгород, Российская Федерация

Ruslan V. Aginey, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Deputy General Director for Science, Giprogazsentr JSC, Nizhny Novgorod, Russian Federation

e-mail: aginey@mail.ru

Некучаев Владимир Орович, д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой «Физика», УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

Vladimir O. Nekuchaev, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Physics Department, USTU, Ukhta, Russian Federation

e-mail: vnekuchaev@ugtu.net

Семиткина Екатерина Владимировна, старший преподаватель кафедры проектирования и эксплуатации магистральных газонефтепроводов, УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

Ekaterina V. Semitkina, Senior Lecturer of Gas and Oil Pipelines Design and Operation Department, USTU, Ukhta, Russian Federation

e-mail: ekaterina-semitkina@mail.ru

Терентьева Марина Владимировна, старший преподаватель кафедры проектирования и эксплуатации магистральных газонефтепроводов, УГТУ, г. Ухта, Российская Федерация

Marina V. Terentyeva, Senior Lecturer of Gas and Oil Pipelines Design and Operation Department, USTU, Ukhta, Russian Federation

e-mail: marina_tufyakova@mail.ru