

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕПЛАСТИКОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НЕФТЕПРОВОДОВ В УСЛОВИЯХ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ

**Б. В. Копей**

Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа  
ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76019, Украина.

**Т. А. Манько**

Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара  
просп. Гагарина, 72, г. Дніпро, 49000, Украина.

**О. П. Роменская, И. А. Гусарова**

Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» имени М. К. Янгеля  
ул. Криворожская, 3, г. Дніпро, 49008, Украина. E-mail: olgaromenskaja@gmail.com

Рассмотрен вопрос о возможности использования углепластика на основе углеродного волокна УКН/5000 (традиционного и модифицированного обработкой атмосферной плазмой в среде акриловой кислоты) в качестве материала трубопроводов нефтяного сортамента. Применение углепластиковых трубопроводов позволит значительно уменьшить вес изделия и повысить его надежность при эксплуатации. В работе проведены экспериментальные исследования прочности углепластиковых трубопроводов внутренним рабочим давлением до 7,5 МПа и количеством циклов нагружения равным 10000. Объектом исследования являются элементы нефтепровода в виде трубы с металлическими втулками на торцах. С помощью металлических втулок образцы элементов нефтепровода из углепластика устанавливали на лабораторный стенд для моделирования воздействия внутреннего рабочего давления особенностей деформирования конструкции образцов. При этом, в качестве жидкости для набора внутреннего давления при испытаниях использовали пластовую воду с нефтепромысла нормальной температуры ( $T = 20^\circ \text{C}$ ). Для прогнозирования максимального ресурса работы нефтепровода из углепластика (традиционного и модифицированного), проведены испытания внутренним давлением до разрушения. Установлена целесообразность применения углепластика для изготовления трубопроводов нефтяного сортамента. При этом, прочность элемента нефтепровода, выполненного из модифицированного углепластика на 20% выше, чем при использовании традиционного углеродного волокна УКН/5000 в качестве наполнителя композита.

**Ключевые слова:** нефтепровод, углепластик, плазма, давление, прочность.

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВУГЛЕПЛАСТИКОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ НАФТОПРОВОДІВ В УМОВАХ, ЩО МОДЕЛЮЮТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ

**Б. В. Копей**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна.

**Т. А. Манько**

Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара  
просп. Гагарина, 72, м. Дніпро, 49000, Україна.

**О. П. Роменська, І. О. Гусарова**

Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» імені М.К. Янгеля  
вул. Криворізка, 3, м. Дніпро, 49008, Україна. E-mail: olgaromenskaja@gmail.com

Розглянуто питання щодо можливості використання вуглепластику на основі вуглецевого волокна УКН/5000 (традиційного та модифікованого обробкою атмосферою плазмою в середовищі акрилової кислоти) в якості матеріалу трубопроводів нафтового сортаменту. Застосування вуглепластикових трубопроводів дозволить значно зменшити вагу виробу та підвищити його надійність при експлуатації, що являється актуальним через часті виходи з ладу внаслідок корозійної дії агресивних середовищ, таких як технологічні рідини або продукція свердловин. Використання модифікованого вуглецевого волокна УКН/5000 атмосферою плазмою в середовищі акрилової кислоти дозволило підвищити адгезійну міцність на границі розділу «сполучник-наповнювач». В роботі проведені експериментальні дослідження міцності вуглепластикових трубопроводів внутрішнім робочим тиском до 7,5 МПа при кількості навантаження рівній 10000 циклів. На основі того, що важливим параметром при дослідженні характеристик елементів нафтопроводів являється деформація, яка виникає при їх навантаженні, в роботі фіксували переміщення вуглепластику в двох напрямках (осьовому та кільцевому) після кожного циклу навантаження за допомогою тензодавачів. Об'єктом дослідження являються елементи нафтопроводу у вигляді труби, діаметром 30 мм та довжиною 300 мм із металевими втулками на торцях. За допомогою металевих втулок зразки елементів нафтопроводу із вуглепластику встановлювали у лабораторний стенд для моделювання впливу внутрішнього робочого тиску на особливості деформації матеріалу в конструкції зразків. При цьому, в якості рідини для набору внутрішнього тиску при випробуваннях використовували пластову воду з нафтопромысла нормальної температури ( $T=20^\circ \text{C}$ ). Для прогнозування максимального ресурсу роботи нафтопроводу із вуглепластику (традиційного та модифікованого), проведено випробування внутрішнім тиском до руйнування. Встановлено доцільність застосування вуглепластику для виготовлення трубопроводів

нафтового сортаменту. При цьому, міцність елемента нафтопроводу, який виконаний з модифікованого вуглепластику на 20% вища, ніж при використанні традиційного вуглецевого волокна УКН/5000 в якості наповнювача композиту.

**Ключові слова:** нафтопровід, вуглепластик, плазма, тиск, міцність.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В нефтяной промышленности эксплуатируется большое количество трубопроводов и изделий нефтяного сортамента. Они имеют большой собственный вес и существенно увеличивают нагрузку на основное нефтяное оборудование [1]. Нефтепроводы часто выходят из строя вследствие коррозионного действия агрессивных сред, таких как технологические жидкости или продукция скважины. Для улучшения экономических показателей добычи нефти в тяжелых условиях возникла необходимость в создании новых трубопроводов и изделий нефтяного сортамента [2–3].

В настоящее время для создания новых трубопроводов все чаще используют полимерный композиционный материал (ПКМ) на основе стеклянных волокон. Использование стеклопластиковых труб по сравнению с традиционными металлическими, имеет ряд преимуществ, основными из которых являются низкая плотность и коррозионная стойкость, что позволяет увеличить срок службы изделия [4–6].

Однако известно, что самыми высокими удельными прочностными характеристиками при низкой плотности, обладают углепластики [7]. Поэтому большой интерес представляет разработка технологии изготовления трубопроводов из них, с целью снижения массы изделия и повышения надежности при эксплуатации.

Данная работа нацелена на подтверждение возможности применения в нефтяной промышленности углепластиков на основе коммерческого низкомолекулярного углеродного волокна УКН/5000, модифицированного плазменной обработкой в среде акриловой кислоты при изготовлении трубопроводов.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Объектом исследования являются элементы нефтепровода (трубы, диаметром 30 мм и длиной 300 мм) из углепластика на основе исходного углеродного волокна марки УКН/5000 и модифицированного углеродного волокна той же марки атмосферной плазменной обработкой в среде акриловой кислоты с эпоксидной матрицей, состоящей из смолы с эпоксидной основой Araldite LY 1135, ускорителя Accelerator 960 и отвердителя Aradur 917 (Huntsman) (рис. 1).

Использование модифицированного углеродного волокна УКН/5000 атмосферной плазменной обработкой в среде акриловой кислоты позволило повысить адгезионную прочность на границе раздела фаз «связующее-наполнитель» за счет возникновения активных групп на поверхности углеродных волокон (ОН, СООН, С=О, С-О-С, -О-О-, NH<sub>2</sub>, NH и др.), ответственных за способность материала к сшивке с эпоксидной матрицей. Установлено повышение физико-механических характеристик модифицированного углепластика по сравнению с исходным до ~18% [8].



Рисунок 1 – Элемент нефтепровода из ПКМ на основе углеволокна

Для подтверждения возможности и целесообразности замены существующих материалов, применяемых при изготовлении трубопроводов в нефтяной отрасли (стальные и стеклопластиковые трубы) на композиционный материал из углеродного волокна УКН/5000 модифицированного плазменной обработкой в среде акриловой кислоты и эпоксидного связующего Huntsman проводили циклические (10000 циклов – ресурс работы трубопровода [9]) гидравлические испытания, внутренним давлением  $P_{\text{раб}}=7,5$  МПа, целью которых являлась оценка характеристик материала, в условиях моделирующих эксплуатационные. В качестве жидкости для набора внутреннего давления при испытаниях использовали пластовую воду с нефтепромысла нормальной температуры ( $T=20$  °С), которая подавалась внутрь элемента нефтепровода по гидравлической системе лабораторного стенда, схема которого приведена на рис. 2.

На основании того, что важным параметром при исследовании характеристик элементов нефтепроводов является деформация, которая происходит при их нагружении, в работе фиксировали перемещения материала в осевом направлении и в окружном направлении после каждого цикла нагружения с использованием тензодатчиков [10]. На рис. 3 представлен элемент нефтепровода с тензодатчиками.

Нагружение элементов нефтепроводов проводили ступенчато с шагом 2,5 МПа и выдержкой во времени 5 минут. На рис. 4 показан график ступенчатого поднятия давления до 2,5 МПа, 5 МПа и 7,5 МПа во время первого цикла. Все последующие циклы (до 10000) проводили без выдержек, за исключением каждого 50 цикла, при которых время выдержек составило 5 мин. при давлении 7,5 МПа.

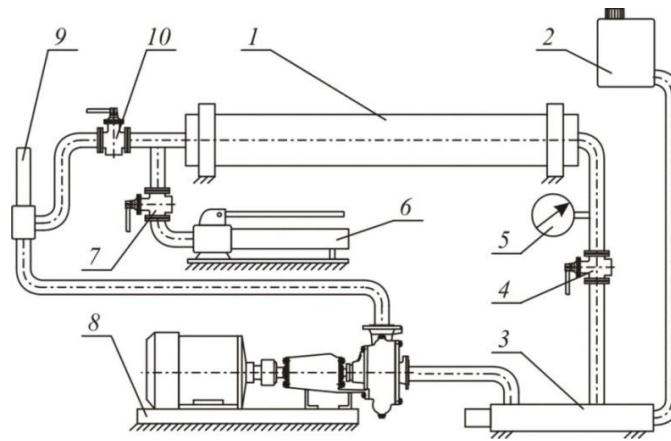


Рисунок 2 – Схема лабораторного стенда для моделирования воздействия внутреннего рабочего давления:  
 1 – элемент нефтепровода; 2 – расширительная емкость; 3 – электронагреватель;  
 4, 7, 10 – кран высокого давления; 5 – манометр;  
 6 – насос высокого давления; 8 – насосный агрегат; 9 – термометр



Рисунок 3 – Элемент нефтепровода с тензодатчиками

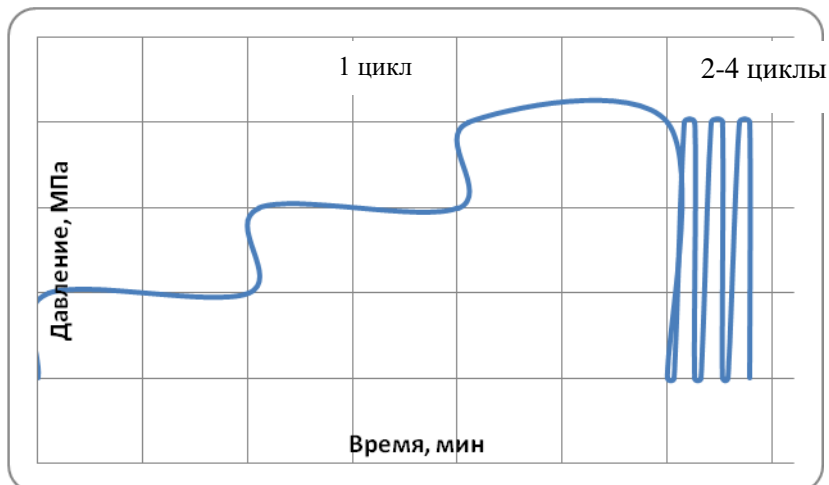


Рисунок 4 – График ступенчатого поднятия давления до 2,5 МПа, 5 МПа и 7,5 МПа во время первого цикла

Во время нагружения фиксировали значения изменения давления и величину относительных деформаций. На рис. 5 представлен график относительных деформаций за первый цикл нагружения элемента нефтепровода из модифицированного углепластика до давления 7,5 МПа. Показания относительных деформаций элементов нефтепроводов из исходного и модифицированного углепластика близки по величине и соответствуют следующим значениям: при внутреннем давлении 2,5 МПа отно-

сительная деформация элементов нефтепроводов составляет 0,1 % в поперечном направлении и 0,2 % в продольном направлении. При повышении внутреннего давления до 5 МПа, относительная деформация увеличивается до 0,2 % в поперечном направлении и 0,4 % в продольном направлении. При максимальном внутреннем давлении, составляющим 7,5 МПа, относительная деформация составляет 0,3 % в поперечном направлении и 0,6 % в продольном направлении.



Рисунок 5 – График относительных деформаций элемента нефтепровода в продольном и поперечном направлениях при нагружении давлением

В результате нагружения потери герметичности и разрушения материала не обнаружено. Установлено, что элементы нефтепровода выдерживают 10000 циклов нагружения внутренним давлением, равным 7,5 МПа. После циклических испытаний при 7,5 МПа элементы нефтепровода были доведены до разрушения.

На рис. 6 представлены образцы нефтепроводов, прошедшие циклические испытания и разрушенные в результате подъема внутреннего давления до максимального.

Параметры, при котором элементы нефтепровода потеряли герметичность и разрушились представлены в табл. 1.



Элемент нефтепровода из исходного углеродного волокна УКН/5000



Элемент нефтепровода из модифицированного углеродного волокна УКН/5000

Рисунок 6 – Элементы нефтепроводов прошедшие циклические испытания и доведенные до разрушения

Таблица 1 – Значения внутреннего давления, зафиксированного при потере герметичности и разрушении элементов нефтепроводов

Номер элемента нефтепровода	Тип наполнителя углепластика элементов нефтепроводов	Величина внутреннего давления, при потере герметичности $P_{гер}$ , МПа	Величина внутреннего давления, при разрушении $P_{разр}$ , МПа
1	УКН/5000 (исходное)	15	22,5
2	УКН/5000 (исходное)	18	21
3	УКН/5000 (модифицированное)	17	27,5
4	УКН/5000 (модифицированное)	19	26,5

**ВЫВОДЫ.** На основании проведенных исследований элементов нефтепроводов в условиях, моделирующих эксплуатационные показано, что элементы нефтепровода из углепластика на основе модифицированного атмосферной плазменной обработкой с акриловой кислотой углеродного

волокна УКН/5000, разрушились при давлении от 26,5 до 27,5 МПа, что на ~ 20% выше давления, при котором разрушились элементы нефтепровода из углепластика на основе исходного углеродного волокна УКН/5000.

Анализ результатов замеров относительных деформаций материала в осевом направлении и в окружном направлении после каждого цикла нагружения элементов нефтепроводов из исходного и модифицированного углепластика показал, что деформации близки по величине и соответствуют следующим значениям: при внутреннем давлении 2,5 МПа относительная деформация элементов нефтепроводов составляет 0,1 % в поперечном направлении и 0,2 % в продольном направлении. При повышении внутреннего давления деформация также увеличивается одинаково для исходного и модифицированного углепластика.

Подтверждена эффективность применения углепластиков, на основе модифицированного атмосферной плазменной обработкой акриловой кислотой углеродного волокна УКН/5000 для изготовления элементов нефтепроводов – труб нефтяного сортамента, диаметром 30 мм.

#### ЛИТЕРАТУРА

- ПАТ «Укрнафта» – найбільша нафтовидобувна компанія України. URL: <https://www.ukrtransnafta.com/> (дата звернення: 05.07.2019).
- Васильев Г. Г., Коробков Г. Е., Коршак А. А. Трубопроводный транспорт нефти. Ред. С. М. Вайнштока: Учеб. для ВУЗов: В 2 т. М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2002. 312 с.
- Нечваль А. М. Проектирование и эксплуатация газонефтепроводов. Учебное пособие. Уфа: ООО «Дизайн Полиграф Сервис», 2001. 165 с.
- Панасюк В. В. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Довідн. посібник / Ред. К.: Наукова думка. Т. 10: Міцність та довговічність нафтогазового обладнання / Ред. В. І. Похмурського, Є. І. Крижанівського. Львів-Івано-Франківськ, ФМІ ім.Г.В. Карпенка НАН України, ІФНТУНГ, 2006. 1193 с.
- Копей Б. В., Архірей М. М., Венгринюк Т. П. Застосування композиційних матеріалів в нафтовидобувному комплексі. *Науковий вісник Національного технічного університету нафти і газу*. № 1(23), 2010. С. 68–76.
- Копей Б. В., Юй Шуанжуй, Стефанишин А. Б. Аналіз ефективності склопластикових, вуглепластикових та гібридних насосних штанг. *Нафтогазова енергетика*. № 2(28). 2017. С. 31–41.
- Каблов Е. Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года. *Авиационные материалы и технологии*. 2012. № 5. С. 7–17.
- Манько Т. А., Гусарова И. А., Самусенко А. А., Роменская О. П. Исследование механических свойств углепластиков с модифицированным наполнителем. *Научно-технический журнал «Технологические системы»*. Киев 1(82)/2018. С. 21–25.
- Копей В. Б., Копей Б. В., Найда А. М. Определение остаточного ресурса трубопроводов с дефектами после их ремонта композитными бандажами. *Управление качеством в нефтегазовом комплексе*. №4, 2007, МФ «Национальный институт нефти и газа». М. С. 26–28.
- Копей Б. В., Стефанишин А. Б., Венгринюк Т. П. Втомна міцність гібридних насосних штанг. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2018. № 4. С. 117–120.

#### EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF CHARACTERISTICS OF CARBON-PLASTIC PIPE-LINE ELEMENTS IN CONDITIONS MODELING THE OPERATING ONES

##### **B. Kopei**

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas  
vul. Karpatska, 15, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine.

##### **T. Manko**

Oles Honchar Dnipro National University  
prosp. Gagarina, 72, Dnipro, 49000, Ukraine.

##### **O. Romenska, I. Gusarova**

Yuzhnoye State Design Office named after M.K. Yangel  
vul. Kryvoriz'ka, 3, Dnipro, 49008, Ukraine. E-mail: olgaromenskaja@gmail.com

**Purpose.** The article aims to confirm possibility of carbon-plastics, based on UKH/5000 commercial low-modulus carbon fiber, modified by plasma treatment method in acrylic acid medium, application in oil industry during pipe-line manufacturing. **Methodology.** Application of carbon-plastic pipe-line will allow significantly reduce weight of product and increase its durability under operation. In paper there are performed experimental investigations of carbon plastic pipe-line strength with internal operational pressure up to 7.5 MPa and 10000 loading cycles. Object of the investigation is pipe-line elements as pipe with metallic bosses on edges. Using metallic bosses, the pipe-line elements samples, made of carbon-plastic were installed on laboratory test-bench to simulate effect of internal operational pressure on special aspects of samples structure deformation. During this, stratal water of normal temperature ( $T = 20^\circ \text{C}$ ) from oilfield was used as a liquid for internal pressure increasing during testing. **Results.** Destructive tests were performed with internal pressure to estimate the maximum operational life of carbon-plastic pipe-line. The effectiveness of carbon-plastic application for oil pipe-line gauge manufacturing. Using modified carbon-plastic, the strength of pipe-line element is by 20% higher than using conventional UKH/5000 carbon fiber as a filler of carbon-plastic. **Originality.** For the first time, use of carbon-plastic, based on UKH/5000 carbon plastic, modified with atmospheric plasma in acrylic acid medium, was proposed for oil pipe-line gauge. The introduced method of testing allowed investigating the carbon-plastic behavior during interaction with operational liquid (stratal water) and internal pressure, which simulated pipe-line operational conditions. **Practical value.** It is proposed to use carbon-plastic, based on modified UKH/5000 carbon

fiber, treated with atmospheric plasma in acrylic acid medium. This method of fiber treated allows enhancing adhesion strength on the interface and so that provides strength and durability of pipe-line.

**Key words:** pipe-line, carbon-plastic, plasma, pressure, strength

REFERENCES

1. PAT «Ukrnafta» – naybil'sha naftovydobuvna kompaniya Ukrainy [Ukrnafta Private Joint Stock Company is the largest oil-producing company of Ukraine] URL: <https://www.ukrtransnafta.com/> (date of treatment: 05.07.2019).
2. Vasilyev, G. G., Korobkov, G. Ye., Korshak, A. A. (2002) *Truboprovodnyy transport nefi* [Oil pipeline transport], M.: OOO «Nedra-Biznestsentr», 312 p.
3. Nechval, A. M. (2001), *Proyektirovaniye i ekspluata-tsiya gazonefteprovodov* [Design and operation of gas and oil pipelines.], Uchebnoye posobiye, Ufa: OOO «Dizayn Poligraf Servis», 165 p.
4. Panasyuk, V. V (2006), *Mekhanika ruynuvannya i mitsnist' materialiv* [Mechanics of destruction and durability of materials], K, Scientific thought. T. 10: Strength and Durability of Oil and Gas Equipment, Lviv-IvanoFrankivsk, G.V. Karpenko, Institute of Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, IFNTUNG, Ukraine, pp. 1193.
5. Kopey, B. V, Arkhirey, M. M, Vengrynyuk, T. P (2010), Zastosuvannya kompozytsiynykh materialiv v naftovy-dobuvnomu kompleksi [Application of composite materials in oil production complex], *Scientific Bulletin of the National Technical University of Oil and Gas*, vol. 1(23), p. 68-76.
6. Kopey, B. V., Yuy, Shuanzhuy, Stefanyshyn, A. B. (2017), Analiz efektyvnosti skloplastykovykh, vuhle-plastykovykh ta hibrydnykh nasosnykh shtanh [Performance analysis of fiberglass, carbon-fiber and hybrid pump rods], *Naftohazova enerhetyka*, vol. 2(28), pp. 31-41 p.
7. Kablov, Ye. N. (2012), Strategicheskiye napravleniya razvitiya materialov i tekhnologiy ikh pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period until 2030], *Aviatsionnyye materialy i tekhnologii*, vol. 5, pp. 7–17.
8. Manko, T. A., Gusarova, I. A., Samusenko, A. A., Romenskaya, O. P. (2018), Issledovaniye mekhanicheskikh svoystv ugleplastikov s modifitsirovannym napolnitelem [The study of the mechanical properties of modified carbon fillers], *Nauchno-tekhnicheskyy zhurnal «Tekhno-logicheskiye sistemy»*, Kyev, vol. 1(82), pp. 21-25.
9. Kopey, V. B, Kopey, B. V, Nayda, A. M (2006), Opredeleniye ostatochnogo resursa truboprovodov s defektami posle ikh remonta kompozitnymi bandazhami [Determination of the residual life of pipelines with defects after their repair by composite bandages], *Quality management in the oil and gas complex*, pp. 26-28.
10. Kopey, B. V., Stefanyshyn, A. B., Venhrynyuk, T. P. (2018), Vtomna mitsnist' hibrydnykh nasosnykh shtanh [Fatigue strength of hybrid pump rods], *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, vol. 4, pp. 117-120.

Стаття надійшла 18.09.2019.