

# Композитный колтюбинг для бурения и внутрискважинных работ

**А.В. ВАХРУШЕВ**, ведущий инженер Межкафедрального центра исследования новых материалов для объектов ТЭК при РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина; **М.Я. ГЕЛЬФГАТ**, к. т. н., в. н. с., профессор кафедры бурения нефтяных и газовых скважин РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина; **В.В. СЛЕДКОВ**, к. т. н., с. н. с., доцент кафедры бурения нефтяных и газовых скважин РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина; **С.В. ЧУПРИН**, генеральный директор ООО «НПО «Фотополимер»

*РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина совместно с производителем композитного колтюбинга ООО «НПО «Фотополимер» провели серию работ по изучению возможности производства и перспективах применения композитного токопроводящего колтюбинга (ТНТ). В статье приводятся полученные результаты и анализ перспектив применения ТНТ для различных операций при строительстве и эксплуатации нефтегазовых скважин.*

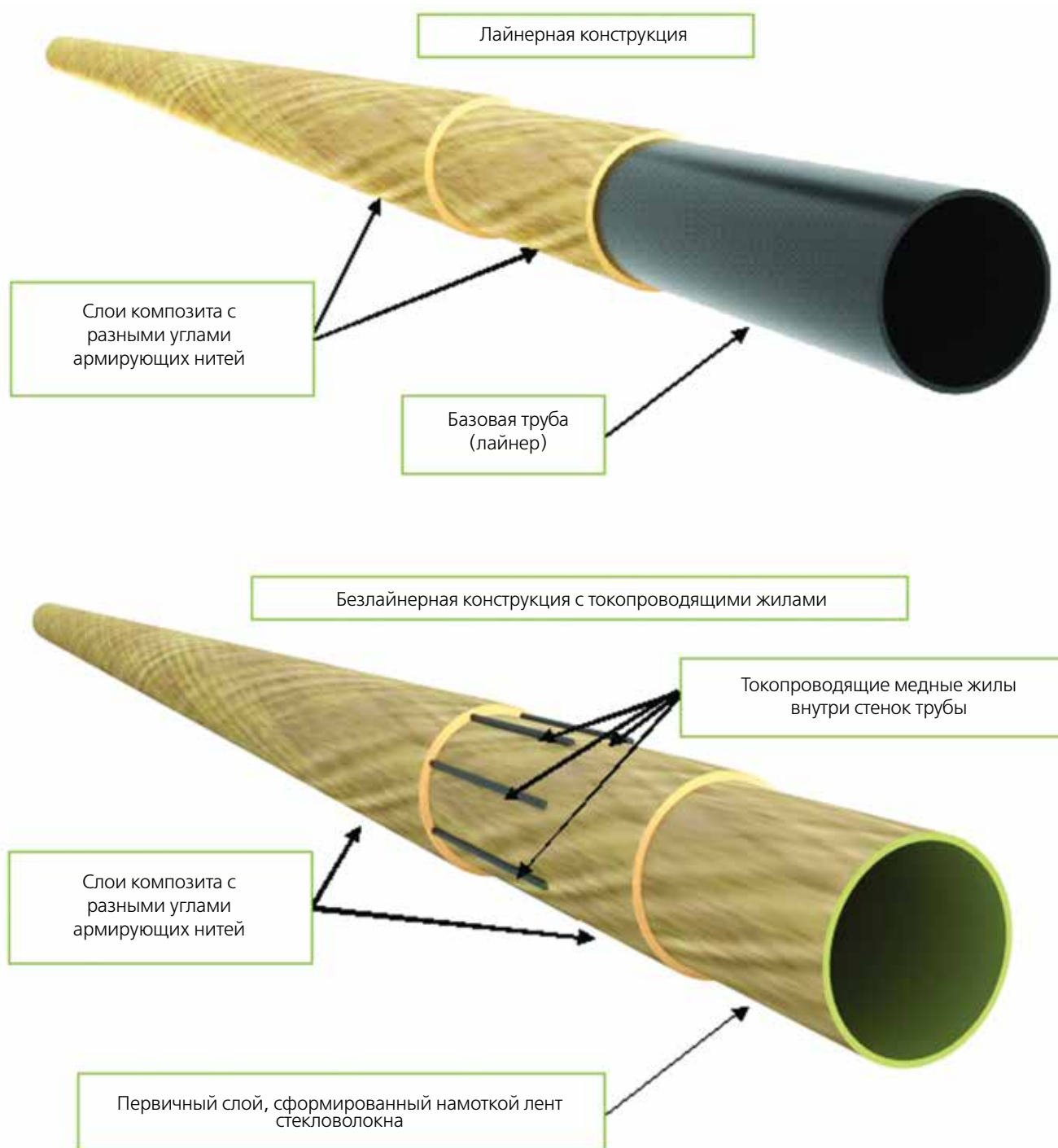
Работы с применением колтюбинга составляют значительную долю на рынке внутрискважинных операций в нефтегазовом секторе. По данным международной организации ICoTA (Intervention and Coil Tubing Association) [1], по состоянию на 2020 год в мире эксплуатировалось 1436 колтюбинговых установок. При этом на регион Россия и СНГ из них приходилось 243 единицы. На начало 2023 года только в России эксплуатировалось не менее 170 установок разных типов для работы с колтюбингом.

В сравнении с традиционными методами проведения буровых и внутрискважинных работ колтюбинговая технология позволяет увеличить мобильность применяемого оборудования, сократить время на проведение работ, повысить скорость спуско-подъемных операций (СПО) и получить значительный экономический эффект.

Большинство эксплуатируемой гибкой насосно-компрессорной трубы (ГНКТ) произведено из стали. В зависимости от марки технические

характеристики таких труб варьируются в широких пределах. При этом стальной непрерывной трубе присущи преимущества и недостатки, обусловленные свойствами материала и условиями эксплуатации. В стремлении к расширению возможностей применения колтюбинговых технологий в современных условиях (рост длины горизонтальных участков и количества сверхдлинных скважин) были предприняты усилия по поиску альтернативных конструкций и новых материалов для ее изготовления. Одним из перспективных направлений в производстве такой трубы является использование конструкции с применением композитных материалов.

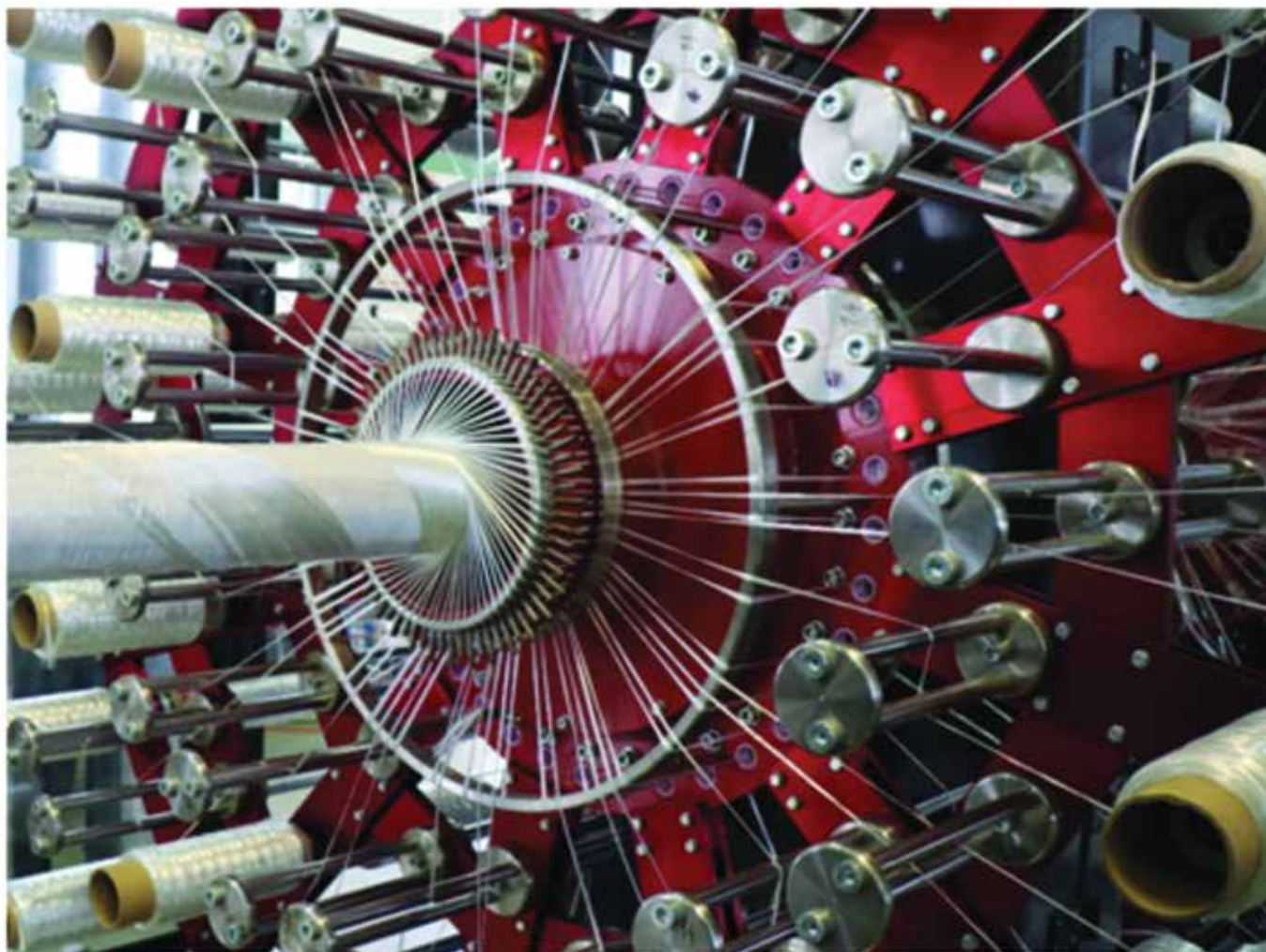
Непрерывная гибкая труба была впервые изготовлена из композитных материалов в 90-х годах прошлого века, и в дальнейшем эта технология совершенствовалась и постепенно внедрялась в сферу нефтегазодобычи. Первоначально такие трубы использовались в качестве внутривидеоскопических



**Рисунок 1 – Композитная труба лайнерной и безлайнерной конструкции**

трубопроводов. По сведениям компании Fiberspar на 2003 год, для наземных трубопроводов только одна эта компания произвела более 600 км композитной непрерывной трубы, которая в основном применялась в Северной Америке [2]. В 1999-2000 годах около 6,5 км композитного колтюбинга диаметром

78 мм с электрическим каналом связи применялись для бурения в Северном море в рамках совместного проекта Anaconda компаний Halliburton и Statoil [3]. В 2016 году компания Magna анонсировала разработку композитной трубы длиной до 3 км, предназначенной для внутрискважинных работ,



**Рисунок 2 – Формирование первоначального слоя композитной трубы на установке намотки**

рассчитанной на давление 105 МПа. Сегодня компания предлагает трубу M-pipe из углеволокна диаметром от 2 до 6 дюймов (50,8–152,4 мм) с допустимым внутренним давлением от 34 до 103 МПа. В 2011 году компания NOV представила свое решение по композитному колтюбингу диаметрами 40 и 50 мм с допустимым давлением 24 МПа. В 2021-м компания Baker Hughes запустила крупное производство композитной непрерывной трубы в Хьюстоне.

### **Композитный колтюбинг**

Композитный колтюбинг – это труба, сформированная непрерывной намоткой нитей матрицы, чаще всего из стекло- и/или углеволокна,

с использованием реактопластовых смол в качестве связующего. Длина трубы ограничивается только вместимостью барабана, на который эта труба наматывается. Композитная труба оканчивается стальным коннектором – узлом перехода от композитной трубы к резьбовому соединению с КНБК. Прочностные характеристики определяются материалом связующего, армирующих нитей, количеством и толщиной слоев, а также направлением нитей в каждом из них. Варианты конструкций показаны на рис. 1 и 2.

К преимуществам композитной непрерывной трубы можно отнести:

- коррозионную стойкость – труба успешно может применяться для



- химической обработки пластов и кислотоструйного бурения;
- высокую усталостную прочность, что обеспечивает увеличенный срок службы и снижение эксплуатационных расходов. Сравнительные испытания, проведенные за рубежом, показывают многократное превышение усталостной прочности композитных труб на базе стекловолокна над показателями стальных ГНКТ;
  - отсутствие деформации в течение всего срока эксплуатации. Поперечное сечение трубы не приобретает овальность;
  - низкий удельный вес, примерно в два-три раза меньше, чем у стальной ГНКТ. Для операций с композитной трубой подойдут установки меньшей грузоподъемности, кроме того, общий вес колонны будет значительно снижен;
  - поскольку в буровом растворе такая труба имеет гораздо большую плавучесть, это будет способствовать достижению забоя на протяженных горизонтальных участках без возникновения баклинга;
  - возможность размещать внутри стенок трубы токопроводящие жилы и каналы связи. Изоляция между жилами обеспечивается покрытием каждого провода и диэлектрическими свойствами разделяющих слоев композита. Канал связи дает возможность высокоскоростного обмена информацией с внутрискважинным инструментом для получения геофизической информации и управления забойной компоновкой в реальном масштабе времени;
  - малую теплопроводность, которая положительно сказывается на снижении отложений на стенках

трубы. Кроме того, при передаче электрической мощности на забой возникает подогрев стенок, что усиливает эффект снижения отложений.

К недостаткам композитной трубы относятся:

- пониженные прочностные характеристики по сравнению со стальной, в частности меньшая прочность на растяжение и кручение, а также меньшее максимально допустимое внутреннее и наружное давление;
- большая толщина стенок трубы, необходимая для получения требуемых прочностных параметров, приводит к уменьшению внутреннего проходного сечения и ухудшению гидравлических характеристик внутреннего канала, а также увеличению жесткости трубы;
- относительно высокая стоимость на сегодняшний день. По мере увеличения объема производства стоимость, вероятно, будет снижаться.

Композитная непрерывная труба как новый вид технологии потребует разработки и внедрения оборудования и инструментов для эксплуатации, неразрушающего контроля, а также методики ремонта и утилизации трубы.

## Программа разработки и внедрения новой технологии

На базе оборудования компании Flexstrong по производству непрерывной композитной трубы для трубопроводов лайнерной конструкции планируется наладить выпуск в России композитного колтюбинга. В рамках подготовки такого производства РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина совместно

с производителем разработали программу разработки и внедрения композитной непрерывной токопроводящей трубы. В 2023 году были выполнены НИР, в ходе которых проведен анализ возможных областей применения и выбор наиболее перспективных. Были предварительно выбраны материалы, конструкция, типоразмеры труб для пилотного проекта, рассчитаны их характеристики и разработана программа лабораторных и стендовых испытаний. Также было проведено сравнительное моделирование применения стального и композитного колтюбинга в различных скважинах, проанализировано оборудование и инструменты, необходимые для работы с композитной непрерывной трубой, и выработаны рекомендации по его модификации.

В 2024-2025 годах запланировано проведение полного цикла лабораторных и стендовых испытаний на образцах-прототипах конечной длины для определения прочностных и эксплуатационных характеристик трубы. В качестве пилотных типоразмеров для освоения и испытаний выбраны трубы 73,0 x 9,5 мм для операций бурения и 50,8 x 9,5 мм для проведения внутрискважинных работ. В таблице 1 приведены расчетные характеристики этих труб.

Наиболее привлекательным способом бурения на композитном токопроводящем колтюбинге является электробурение [4]. В связи с этим в конструкции ТНТ 73 мм предусматриваются силовые жилы,

**Таблица 1 – Характеристики композитного колтюбинга**

Параметры композитного колтюбинга	ТНТ 73,0 x 9,5	ГКТ 50,8 x 9,5
Внешний диаметр, мм	73,0	50,8
Толщина стенки, мм	9,5	9,5
Внутренний диаметр, мм	54,0	31,8
Номинальное внутреннее давление, МПа	31,6	47,9
Масса погонного метра трубы, кг	4,29	2,79
Максимальная растягивающая нагрузка, т	26,4	17,1

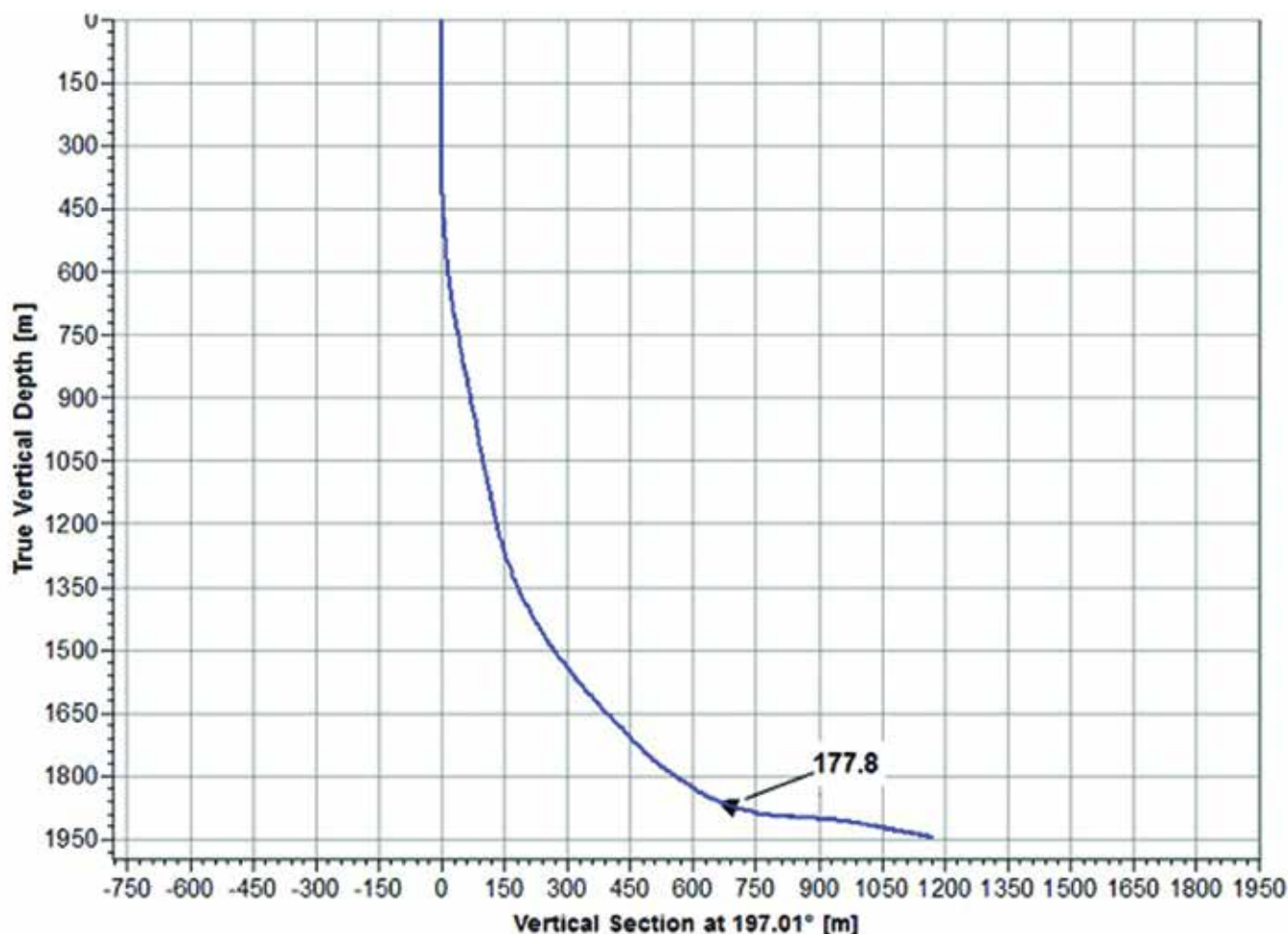
позволяющие передавать мощность до 35 кВт.

## Моделирование применения

Для моделирования поведения композитной непрерывной трубы в реальных скважинах были проведены сравнительные расчеты напряженно деформированного состояния колонны и гидравлики для скважин различного профиля и нескольких вариантов компоновок. Компьютерное моделирование проводилось с помощью программного пакета Landmark Wellplan.

Для оценки возможности применения композитной трубы при бурении были взяты исходные данные по типовой скважине одного из месторождений в России. На рисунке 3 представлен профиль скважины, а в табл. 2 компоновки колонны, по которым был сделан расчет. Моделировалось бурение в интервале 2440–2930 м открытого ствола диаметром 120,6 мм из-под обсадной колонны 178 мм, с зенитным углом 81-88 градусов.

Исходный вариант № 1 соответствует применяемой на данном месторождении компоновке на стальных ГНКТ. В варианте № 3 исследовалась возможность



**Рисунок 3 – Профиль типовой скважины для бурения на ГНКТ**

применения исходной КНБК с заменой ГНКТ на композитную непрерывную трубу. В варианте № 2 компоновка состояла из стальных ГНКТ, электробура ВЭД95 (НД 95 мм, номинальная мощность 35 кВт) и системы направленного бурения СНБ-89. При этом подразумевалось, что электрическая мощность и сигнал управления передавались на КНБК по кабелю, запасованному внутри ГНКТ, и, соответственно, при расчете гидравлики учитывалось уменьшение внутреннего проходного сечения трубы за счет нахождения

**Таблица 2 – Варианты компоновок для моделирования бурения на колтюбинге**

Компоновка № 1	Компоновка № 2	Компоновка № 3	Компоновка № 4
<ul style="list-style-type: none"> <li>ГНКТ 66,7 RT-80 с толщиной стенки от 5,2 до 4,4 мм</li> <li>Винтовой двигатель ДВ95-Р с регулятором угла</li> <li>PDC 120,6 мм</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ГНКТ 66,7 RT-80 с переменной толщиной стенки от 5,2 до 4,4 мм с кабелем D20 мм внутри</li> <li>Система направленного бурения СНБ-89Э</li> <li>Электробур ВЭД-95</li> <li>PDC 120,6 мм</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Композитная ТНТ 73,0 x 9,5 мм</li> <li>Винтовой двигатель ДВ95-Р с регулятором угла</li> <li>PDC 120,6 мм</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Композитная ТНТ 73,0 x 9,5 мм</li> <li>Система направленного бурения СНБ-89Э</li> <li>Электробур ВЭД-95</li> <li>PDC 120,6 мм</li> </ul>

внутри силового кабеля. Вариант № 4 рассматривал применение композитной ТНТ с передачей электрической мощности и сигнала по жилам внутри стенок композитной трубы к КНБК, аналогичному по составу с вариантом № 2.

Расчет напряженно-деформированного состояния



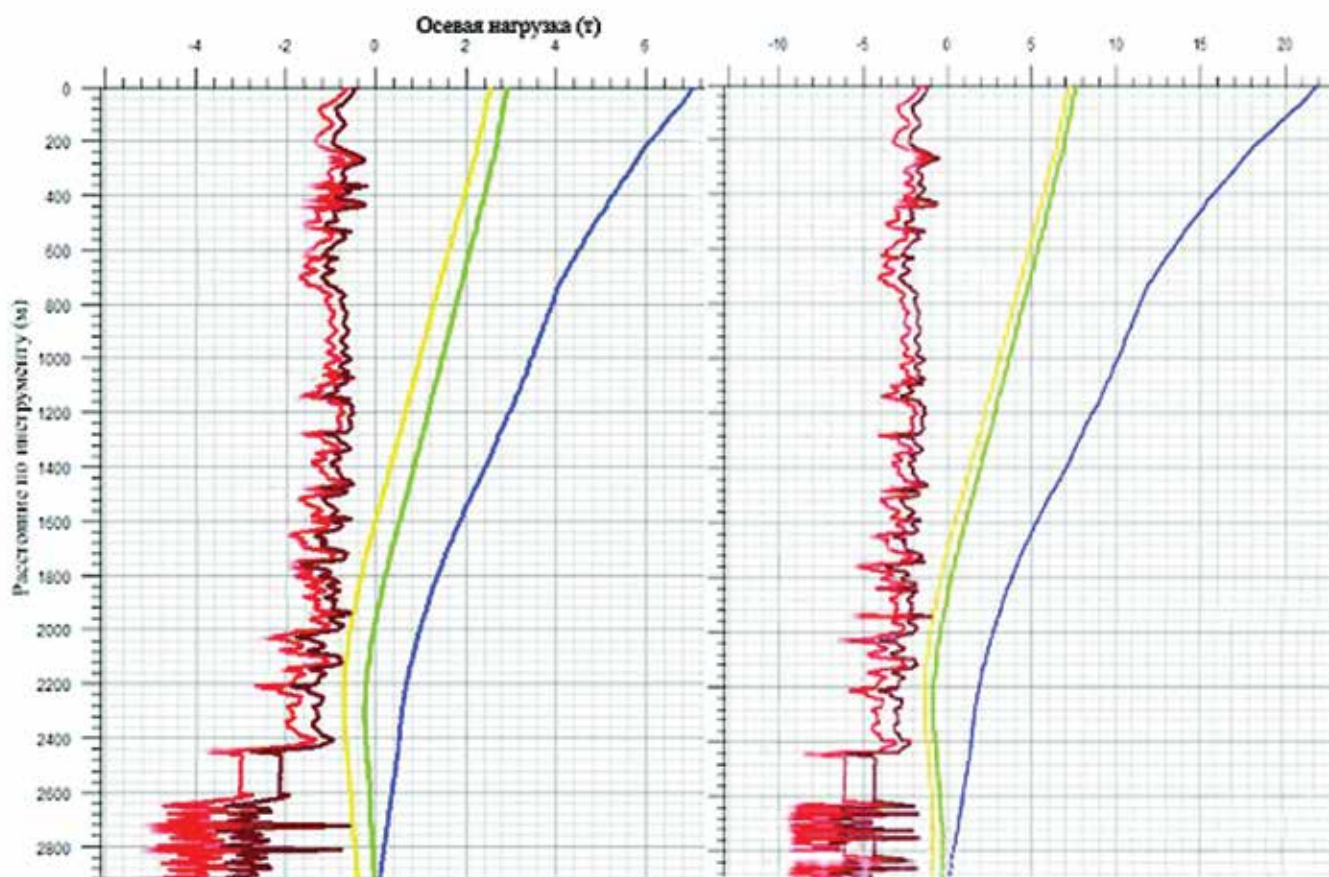


показал, что композитная колонна 73,0 мм успешно заменяет ГНКТ 66,7 мм. Такая колонна позволяет производить операции спуска и бурения без потери продольной устойчивости, подобно стальной ГНКТ, а ее вес будет значительно ниже. По расчетам, вес на подъем компоновок № 3 и № 4 составил всего 7 тонн, что в три раза меньше, чем у компоновок № 1 и № 2 (рис. 2). Гидравлический расчет показал, что требуемое давление на всех режимах эксплуатации значительно меньше, чем максимально допустимое внутреннее давление для композитной ГНКТ. При этом наименьшими гидравлическими потерями будет обладать компоновка № 4 с композитной токопроводящей

трубой, СНБ и электробуром.

Моделирование спуска инструмента для промывки забойной зоны проводилось на профиле скважины с большим отходом от вертикали на месторождении Ю. Корчагина в Каспийском море. Информация по профилю, коэффициентам трения, компоновке и типоразмеру стальной ГНКТ была взята из публикации в открытых источниках [5]. Общая длина скважины до забоя составляла 7200 м при длине горизонтального участка свыше 4,5 км. Для моделирования были взяты стальная труба 50,8 мм переменной толщины стенки от 5,2 до 2,8 мм и композитная труба 50,8 мм со стенкой 9,5 мм. По результатам расчетов получилось, что:

- обе компоновки выдерживают



**Рисунок 4 – Графики эффективных осевых нагрузок**

**(компоновки с ГНКТ № 1 и № 2 – график слева, компоновки с композитной ГКТ (ТНТ) № 3 и № 4 – график справа)**

**Обозначения линий: красная – спиральный баклинг, коричневая – синусоидальный баклинг, желтая – бурение, зеленая – спуск в скважину, синяя – подъем**

растягивающие нагрузки при подъеме;

- вес композитной колонны на подъем более чем в два раза меньше, чем у стальной;
- обе колонны потребуют забойный «трактор» для спуска на забой, при этом при спуске без «трактора» композитная колонна спускается на 330 м глубже стальной;
- композитная колонна будет иметь повышенное гидравлическое сопротивление из-за толщины стенки, но прочностные характеристики трубы ТНТ позволяют проводить промывку даже на глубине 7200 м. Гидравлическое сопротивление композитной трубы можно снизить, если разработать конструкцию с переменной толщиной стенки. По результатам проведенных исследовательских работ и расчетного моделирования были сделаны выводы по возможности применения композитной непрерывной трубы для всех основных операций с колтюбингом. При этом композитная ТНТ с подачей электрической мощности на забой по кабелям, проложенным внутри стенок трубы, имеет преимущество над ГНКТ с кабелем, особенно в применении совместно с электробуром, по гидравлическим показателям и простоте эксплуатации. Одновременно с этим высокоскоростной электрический канал связи в такой трубе кардинально увеличивает количество информации, получаемой в реальном времени от геофизических приборов с забоя, и позволяет успешно работать с автоматизированной системой направленного бурения и «трактором» с электроприводом. При спуске на забой компоновка с

композитной трубой обеспечивает спуск на большую глубину без баклинга, а при использовании «трактора» потребуется меньшее усилие на «тракторе» при протягивании колонны. Композитная труба обладает необходимыми прочностными характеристиками для выполнения операции промывки на большинстве существующих скважин, в том числе со сверхдлинным отходом от вертикали.

### Дополнительные НИОКР

В результате проведенного исследования были намечены вопросы, требующие обязательного решения для ввода композитной непрерывной трубы в эксплуатацию:

- подбор колтюбинговой установки под барабан с трубой ТНТ и модификацию барабана, включая изменение узла крепления трубы к барабану и узла подачи электрической мощности и сигнала на токопроводящие жилы трубы;
- разработка переходного узла от композитной трубы к стальной КНБК. Этот узел должен иметь прочность на растяжение, крутящий момент и усталостную прочность выше, чем основное тело композитной трубы, при этом узел должен иметь контактную группу для передачи электрической мощности;
- подбор материала, проектирование и изготовление вкладышей инжектора под композитную трубу;
- разработка ловильного инструмента, специализированного для работы с трубой ТНТ;
- разработка оборудования неразрушающего контроля композитной трубы;
- разработка технологии ремонта и утилизации композитной трубы;



- разработка оборудования и инструментов для расширения возможностей эксплуатации трубы ГНТ, таких как электрический забойный «трактор», управляемый по электрическому каналу, электробур, система направленного бурения, геофизические приборы и т. д.



**Рисунок 5 – Фрагмент производственной линии по изготовлению композитной непрерывной трубы в Подмоскowie**

Работы по данным направлениям планируется проводить параллельно с испытаниями композитной трубы в 2024-2025 годах, что позволит выйти на рынок с готовым решением по композитному токопроводящему колтюбингу, а также комплексу оборудования и инструментов для его применения в скважине.

Композитная непрерывная труба, планируемая к производству в России, будет выпускаться на заводе НПО «Фотополимер» в Подмоскowie. Импортное оборудование завода в настоящее время смонтировано и находится в состоянии пусканаладки (рис. 5). Пилотная партия продукции намечена на выпуск в 1-м квартале 2025 года. Производственная линия позволяет выпускать около 700 м трубы в сутки (с наружным диаметром 50,8 мм и 73,0 мм).

## Выводы

Технология композитной непрерывной токопроводящей трубы является перспективным направлением, имеющим большое будущее. Запуск производства такой трубы в России, комплекс научно-исследовательских работ, уже проведенный и запланированный

на 2024 год, будут способствовать скорейшему внедрению данной технологии в нашей стране.

## Благодарность

*Авторы настоящей публикации выражают благодарность участникам программы разработки и внедрения композитной непрерывной токопроводящей трубы из ОАО НПО «Буровая техника – ВНИИБТ» и Группы ФИД за их вклад в проведенную работу и предоставленные материалы.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Официальный сайт организации ICoTA (05/12/2023) <https://www.icota-canada.com/page-18107>
2. Michael Feechan, Chris Makselon, Stephen Nolet, Fiberspar Corp. Composite coiled tubing enables innovative installation techniques // OFFSHORE. – Июнь. – 2003. <https://www.offshore-mag.com/business-briefs/equipment-engineering/article/16755450/composite-coiled-tubing-enables-innovative-installation-techniques>
3. Roy Marker, John Haukvik, James B. Terry и др. Anaconda: Joint Development Project Leads to Digitally Controlled Composite Coiled Tubing Drilling System // SPE-60750-MS. – Апрель. – 2000.
4. Гельфгат М.Я. и др. Перспективы электробурения на ГНКТ при строительстве, реконструкции и ремонте высокотехнологичных скважин // Вестник Ассоциации буровых подрядчиков. – 2023. – № 1. – С. 11–22.
5. Елисеев Д., Земчихин А., Бяков А., Кичин А., Лобов М., Бурдин К., Мазитов Р., Бравков П., Степанов В. Уникальный опыт применения ГНКТ на скважинах с большим отходом от вертикали в Каспийском море // Время колтюбинга. – № 2 (052). – Июнь. – 2015.