

УДК 67.04

**А.Р. Людвиницкая**, к.т.н.; **В.В. Шайдаков**, д.т.н., профессор, кафедры «Гидравлика и гидромашины», Уфимский государственный нефтяной технический университет; **Р.Б. Паливода**, ведущий инженер, ОАО «Славнефть–Мигеоннефтегаз»; **К.В. Чернова**, заместитель директора, ООО «Инжиниринговая компания «Инкомп–Нефть»; **А.А. Халилов**, «Учебно–научный центр Геофизика»

# УПРУГО–ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ПОЛИМЕРНЫХ АРМИРОВАННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В НЕФТЕГАЗОПРОМЫСЛОВЕЕ ОБОРУДОВАНИИ

*В статье рассмотрены области применения полимерных армированных трубопроводов. Произведен расчет напряжений, возникающих в армирующей оплетке трубопровода. Проведены лабораторные испытания на предельное давление разгерметизации в зависимости от температуры рабочей жидкости. Аналитически доказана возможность упрочнения полимерных армированных трубопроводов за счет изменения конструктивных параметров армирования.*

Современный этап развития нефтегазовой промышленности можно охарактеризовать поиском новых материалов. Все чаще производится замена металлических трубопроводов на полимерные, что обусловлено уникальными свойствами полимеров, такими как низкое влагопоглощение и газопроницаемость; высокие диэлектрические показатели и химическая стойкость. Данные свойства позволяют широко использовать трубы и фасонные изделия из этих материалов в строительной индустрии и в нефтегазовом комплексе. Следует отметить, что наряду с достоинствами полимерные трубопроводы обладают существенным недостатком – жесткие ограничения по рабочему давлению, напрямую зависящему от температуры рабочей жидкости и окружающей среды.

Одним из способов повышения прочностных характеристик полимерных трубопроводов является их армирование металлом, волокнами различной природы, лентами. На рынке представлен довольно широкий спектр полимерных трубопроводов с металлической армирующей оплеткой, способных выдерживать избыточное давление до 25 МПа (рис. 1).

## В НЕФТЕГАЗОВОМ КОМПЛЕКСЕ ПОЛИМЕРНЫЕ АРМИРОВАННЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ ПРИМЕНЯЮТСЯ:

- а)** в насосных дозировочных системах подачи химического реагента в скважину (на прием насоса, в колонну НКТ, в интервал перфорации) (рис. 2);
- б)** подача химреагента при одновременно-раздельной эксплуатации;
- с)** при удалении жидкости с забоя газовой скважины в миниколтюбинговой установке для подачи пенообразователя;
- д)** для замера давления в скважинах с насосами-«перевертышами»;
- е)** в компоновках для оснащения скважин с негерметичной колонной, обеспечивая отвод газа из-под пакера;
- ф)** для создания гидрозатвора в штанговом глубинном насосе с целью предотвращения попадания мехпримесей в пару трения.

В каждой из представленных систем схема нагружения металлополимерного трубопровода различна. Это требует тщательного анализа условий работы для выбора оптимальной конструкции на основании сопоставления нагрузок и результатов исследования механических характеристик трубопроводов.

Нагрузки, возникающие в армированном полимерном трубопроводе, рассмотрим на примере используемого в нефтегазовом оборудовании трубопровода ТГ – 5/15 (рис. 16) [1]. Наружный диаметр – 15 мм, внутренний – 5 мм. Материал – полипропилен, армированный двумя слоями проволоки, позволяющей воспринимать радиальные нагрузки и восстанавливать проходное сечение после их снятия, что несвойственно другим типам капиллярных трубопроводов. Наружный диаметр трубопровода позволяет укладывать его вместе с кабелем ПЭД, который обеспечивает дополнительную защиту при спуске системы.

Для понимания процессов, происходящих в трубопроводе при его работе, вначале рассмотрим данный трубопровод как тело цилиндрической формы, нагруженное внутренним давлением так, что нагрузка вдоль оси цилиндра не меняется. Примем, что длина трубопровода не ограничена, на соотношение между внутренним и наружным диаметрами ограничений не накладывается.

Каждая точка трубопровода при его нагрузке получит перемещения в соответствии с упруго-прочностными свойствами. Так как трубопровод считается



а)

б)

в)

**Рис. 1. Полимерные армированные трубопроводы**  
 а) трубопровод, армированный металлической проволокой; б) трубопровод, армированный металлической проволокой и стальной лентой; в) трубопровод с системой подогрева

бесконечно длинным, то по условиям симметрии будем считать, что эти перемещения будут происходить в радиальных плоскостях.

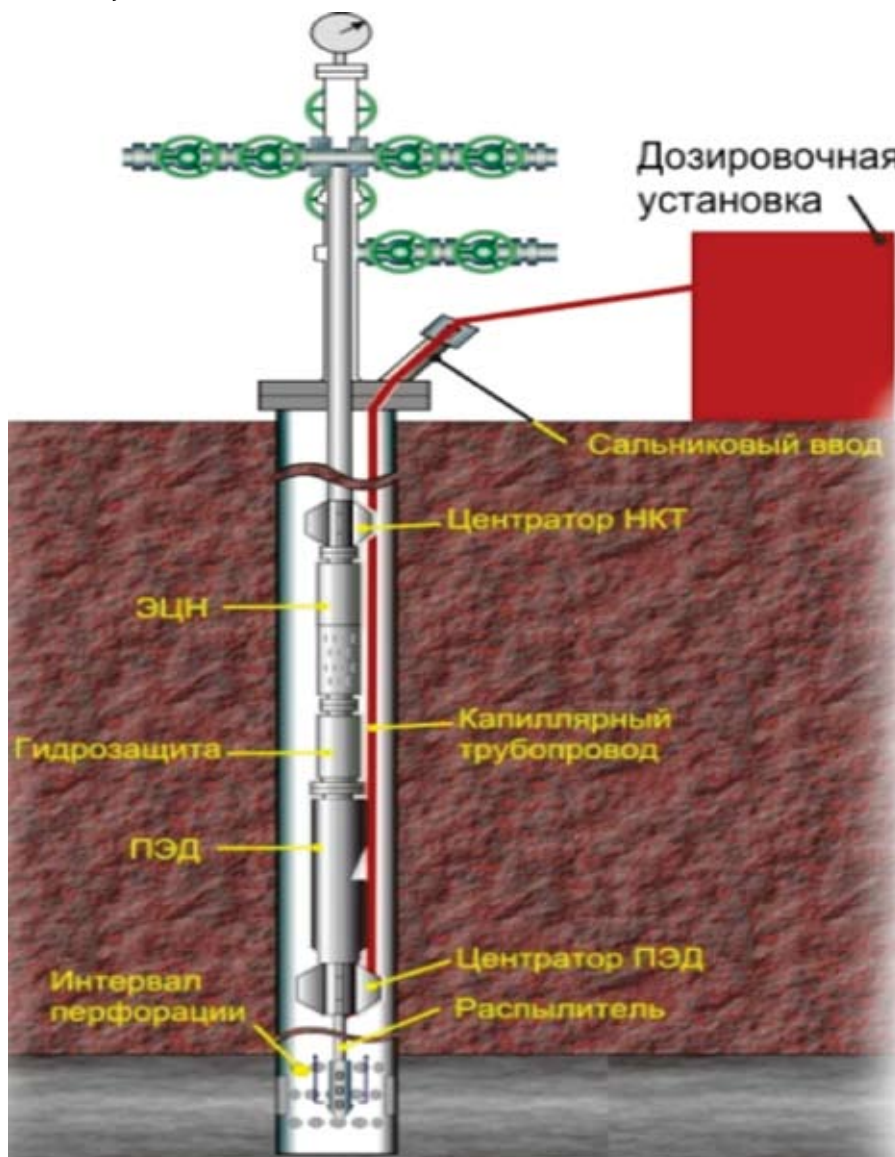
При нагружении трубопровода, в случае когда внутреннее давление ( $P_R \ll P_T$ ) нагрузки, возникающие в стенке, можно записать в следующем виде [2]:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{P_T^2}{R^2 - r^2} \left( 1 - \frac{R^2}{r^2} \right), \\ \sigma_t = \frac{P_T^2}{R^2 - r^2} \left( 1 + \frac{R^2}{r^2} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\sigma_r$  – радиальное напряжение;  
 $\sigma_t$  – окружное напряжение;  
 $P_T$  – давление внутри трубопровода;  
 $P_R$  – давление внешнее;  
 $R$  – внешний радиус трубопровода;  
 $r$  – радиус до произвольно взятой точки.

Только за счет толщины стенки полимерного трубопровода не обеспечить необходимой прочности. Одним из способов повышения прочности полимерных трубопроводов является их армирование. Для упрощения полимерный армированный трубопровод рассмотрим как трубопровод, состоящий из четырех слоев: первый – внутренний, изготовленный из полимера; второй и третий – из материала, эквивалентного по прочностным показателям армированному полимеру (второй и третий слои выполнены из полимера, армированного стальной проволокой, причем в каждом слое направление навивки встречное); четвертый – внешний из полимера.

Предполагая, что распределение напряжений по толщине слоев тру-



**Рис. 2. Схема дозированной системы для подачи химреagenta**

бопровода происходит равномерно, можно определить, какое напряжение испытывает каждый слой проволоочной оплетки. Оплетка представляет собой проволоку, навитую без натяга

на полимер под углом  $40^\circ$  относительно образующей цилиндрической поверхности. Зная расстояние от центра трубопровода до каждого слоя оплетки и внутреннее давление, определим

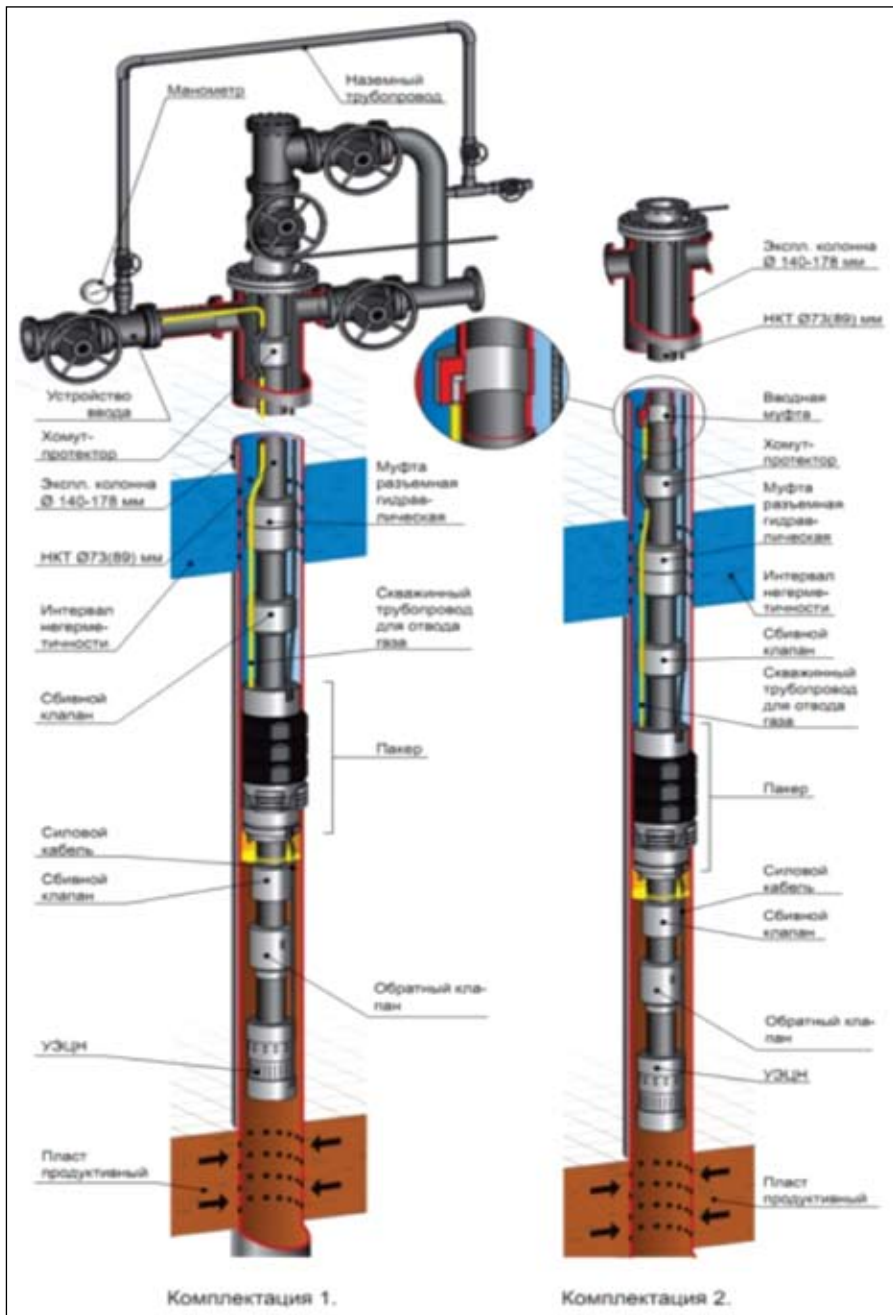


Рис. 3. Схема отвода газа из-под пакера

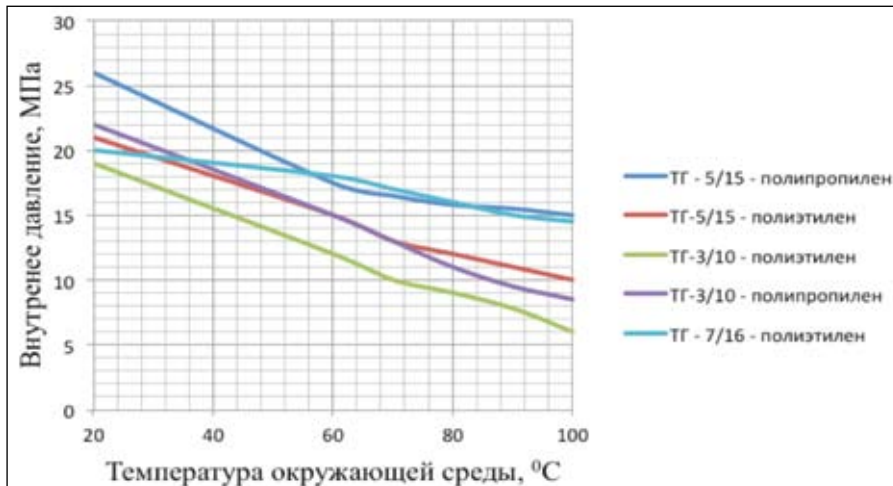


Рис. 4. Зависимость давления разгерметизации металлополимерных трубопроводов от температуры окружающей среды

в этом слое напряжения. Проволочная оплетка рассматривается как цилиндрическая пружина. С учетом геометрии оплетки определяем максимальные касательные напряжения в крайних точках поперечного сечения проволоки:

$$\tau_{\max} = k \cdot \frac{8 \cdot N \cdot D}{\pi \cdot d^3}, \quad (2)$$

где D – диаметр оплетки;  
k – коэффициент, учитывающий геометрию армирования;  
d – диаметр армирующей проволоки;  
N – сила, действующая по нормали к сечению оплетки.

В качестве примера рассчитаны напряжения, возникающие в армирующей оплетке трубопровода ТГ – 5/15 при создании избыточного давления в трубопроводе. В результате отмечено, что касательные напряжения в армирующей оплетке растут пропорционально внутреннему давлению. При изменении давления на 10 МПа касательные напряжения в армирующей оплетке возрастают примерно в два раза. Вектор касательных напряжений направлен под углом к оси трубопровода и разнонаправлен в слоях, что приводит к деформации трубопровода при повышении давления и уменьшению его прочности. Это позволяет заключить, что с помощью изменения угла наклона повива оплетки и диаметра армирующих проволок можно значительно повышать прочностные характеристики трубопровода.

Для определения влияния температуры на механические характеристики металлополимерных трубопроводов были проведены испытания на предельное внутреннее давление разгерметизации при различных температурах окружающей среды. Стенд и методика испытаний представлены в статье [3]. В результате были получены зависимости предельного давления разгерметизации от температуры для трубопроводов: ТГ – 5/15, ТГ – 3/10, ТГ – 7/16 (рис. 4).

Для реального трубопровода конечной длины при увеличении избыточного давления в трубопроводе происходит его радиальная деформация (увеличивается диаметр) и уменьшается длина, что необходимо учитывать при подаче реагентов в различные интервалы скважины, чтобы исключить разгерметиза-

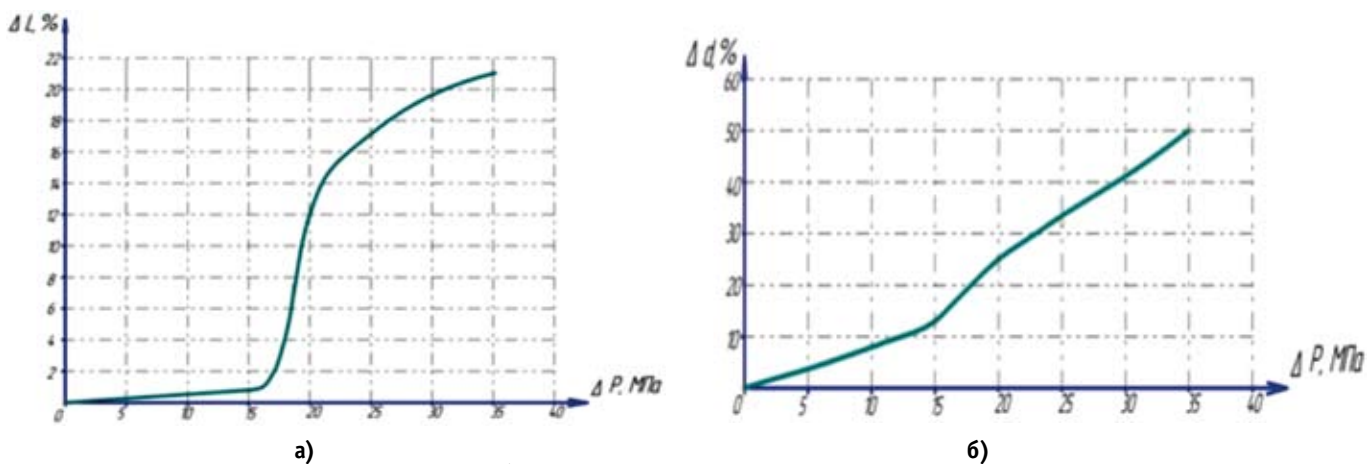


Рис. 5. Деформация металлополимерного трубопровода от внутреннего давления а) относительное изменение длины; б) относительное изменение диаметра

цию трубопровода по заделке. Например, для армированного полимерного трубопровода ТГ – 5/15 в рабочем интервале до 15 МПа относительное увеличение диаметра не превышает 10%, снижение длины не превышает 1% (рис. 5). Данное изменение учитывается при проектировании, спуске и эксплуатации капиллярной системы с использованием полимерных армированных трубопроводов.

С учетом влияния температуры на прочностные характеристики трубопровода и изменения внутреннего диаметра была получена зависимость изменения пропускной способности данного трубопровода от температуры и рассчитана рекомендуемая область применения полимерного армированного трубопровода данного конструктивного исполнения (рис. 6).

Область применения была ограничена эксплуатационным давлением 15 МПа, с учетом снижения прочности с повышением температуры и запасом 5%. Для безотказной работы металлополимерного трубопровода ТГ – 5/15 при температуре окружающей среды до 40 °С подача жидкости в скважину не должна превышать 170 л/ч, при повышении температуры до 90 °С максимальная пропускная способность трубопровода составляет примерно 150 л/ч.

**ВЫВОДЫ:**

1. В последнее время неуклонно растет использование полимерных армированных трубопроводов при добыче нефти и газа. Появляются новые направления использования. Объем поставок планируется около 200 км в год.

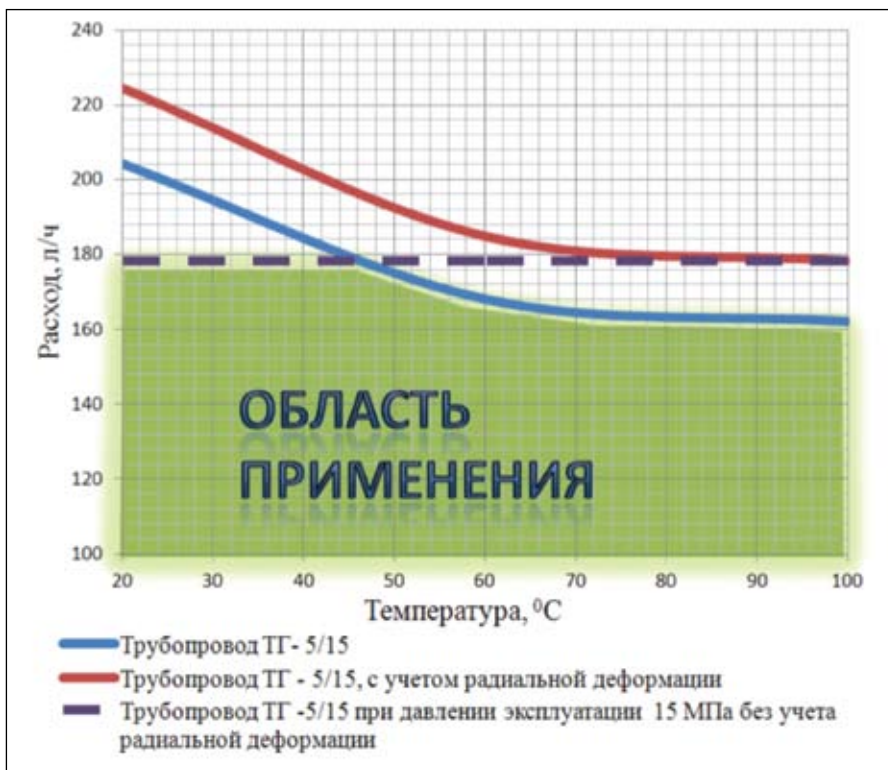


Рис. 6. Пропускная способность полимерного армированного трубопровода ТГ – 5/15 в зависимости от температуры окружающей среды

2. Аналитически доказана возможность существенного упрочнения полимерных армированных трубопроводов за счет изменения конструктивных параметров армирования.

3. В результате стендовых испытаний определены параметры эксплуатации полимерных армированных трубопроводов, учитывающие температуры, давление, деформации и расход.

**Литература:**

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1967. – 552 с.
2. Людвиницкая А.Р. Повышение надежности металлополимерных трубопроводов с соединительными элементами / А.Р. Людвиницкая, В.В. Шайдаков, Р.Б. Паливода, Е.В. Шайдаков, К.В.Чернова, А.А. Халилов // Территория НЕФТЕГАЗ – 2011. – №10. – С. 12–15.

**Ключевые слова:** металлополимерный трубопровод, испытания на прочность, предельное давление, напряжения в трубопроводе, область применения.