

УДК 67.04

**А.А. Антоненко**, аспирант, Учебно-научный центр «Геофизика», e-mail: andr-antonen@yandex.ru;

**В.В. Шайдаков**, докт. техн. наук, профессор, e-mail: v1v2sh50@yandex.ru;

**А.Р. Людвиницкая**, канд. техн. наук, доцент, Уфимский государственный нефтяной технический университет, e-mail: ljudvinickaja@yandex.ru

## ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОЛИМЕРНОЙ АРМИРОВАННОЙ ТРУБЫ

*В статье рассмотрены результаты исследований по изменению механических параметров полимерной армированной трубы (ПАТ). Описаны зависимости величины диаметра армирующего элемента, условного модуля упругости от угла навива. Описана стендовая установка, используемая для проведения исследований. Проведены результаты испытаний зависимости жесткости и условного модуля упругости от величины внутреннего давления и осевой растягивающей нагрузки. Представлены графические зависимости диаметра армирующего элемента от угла навива и механических характеристик от внешних нагружающих сил.*

**Ключевые слова:** полимерная армированная труба, испытания на жесткость, условный модуль упругости, угол навивки, армирующий элемент.

На протяжении многих лет компания ООО «Инжиниринговая компания «Инкомпнефть» использует полимерные армированные трубы (ПАТ) различных конструкций и типоразмеров в комплексных установках дозирования химических реагентов, отвода газа из-под пакера [6]. Помимо этого, ПАТ применяется нетрадиционно – в колтюбинговых системах, как колонна насосно-компрессорных труб и штанговая колонна [4].

ПАТ при работе нагружается внешним и внутренним давлением среды, величина которого доходит до 40 МПа. Имеют

место и радиальные нагрузки при проведении спуско-подъемных операций. Они возникают при соприкосновении между обсадной колонной и колонной насосно-компрессорных труб, между которыми и находится ПАТ. Эти растягивающие нагрузки доходят до нескольких тонн.

В существующих конструкциях ПАТ в связи с ее широким применением есть необходимость улучшения механических параметров. Особое значение имеют допустимое давление и грузонесущая способность.

Авторами проводились исследования по влиянию на вышеописанные параметры угла навива армирующих элементов и предварительного нагружения внутренним давлением или растягивающей нагрузки. Результаты исследований изложены в данной статье.

Одним из основных, наиболее важных вопросов является выбор оптимальной конструкции ПАТ для работы при заданных условиях. Как известно, ПАТ состоит из внутреннего полимерного канала, нескольких слоев армирующих элементов, навитых под определенным углом

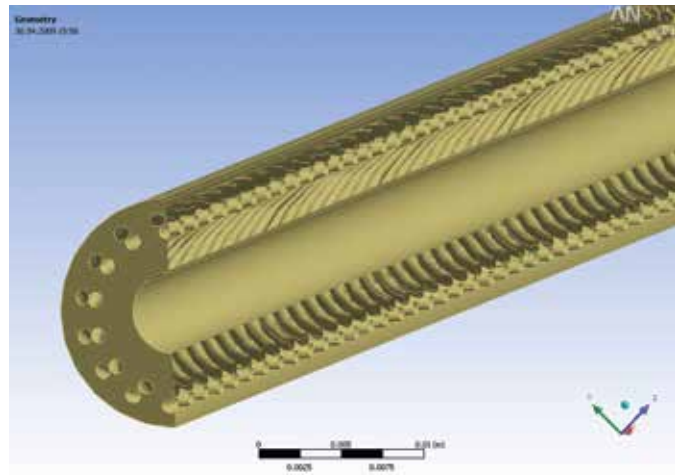
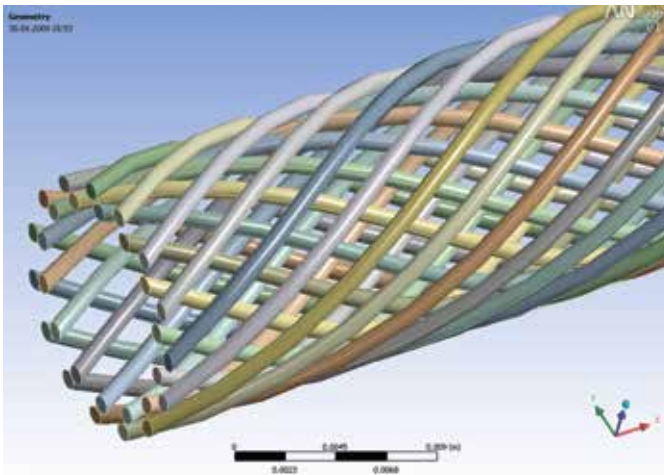


Рис. 1. Полимерный армированный трубопровод

относительно оси трубы, и внешнего защитного полимерного слоя (рис. 1), образующих монолитную конструкцию. Улучшения механических параметров ПАТ можно достичь, изменив либо ее конструкцию при изготовлении, либо условия нагружения на армирующие элементы. В данной статье авторы рассматривают два этих направления, без влияния материалов изготовления ПАТ. Общеизвестно, что от угла навива армирующих элементов зависит величина допустимых нагрузок. Корректируя этот параметр, можно изменить величины условных модулей упругости и жесткости и к тому же получить ПАТ, лучше работающую на внутреннее давление или растягивающую нагрузку.

ПАТ по конструкции с учетом определенных допущений можно сравнить с канатом одинарной свивки и органическим сердечником. Армирующие элементы, как и пряди каната, играют основную роль в восприятии нагрузок, приходящихся на ПАТ, поэтому воспользуемся известными формулами для проектирования конструкции стальных канатов, описанных М.Ф. Глушко [1], в которых раскрывается зависимость диаметра армирующих элементов от угла их навива. При расчете полимерной армированной трубы использовались следующие допущения:

1. Осевые и радиальные нагрузки ввиду того, что прочностные параметры материалов армирующих элементов выше, чем у полимерных материалов, используемых в ПАТ, воспринимаются каркасом из навитых армирующих элементов, а полимерная оболочка выполняет связующую и защитную функции.

2. При формировании конструкции между армирующими элементами первого слоя есть собственный тангенциальный контакт (элементы в каждом слое навиты плотно друг к другу), а контакт армирующих элементов наружного и внутреннего слоев будет радиальным [1], т.к. точка контакта армирующих элементов расположена на линии радиуса поперечного сечения трубы.

3. Направления навива каждого слоя противоположны.

В ПАТ также выполняется собственный тангенциальный контакт (по тер-

минологии М.Ф. Глушко) армирующих элементов между собой в пределах одного слоя. Поэтому для нахождения параметров навива при таком контакте армирующих элементов воспользуемся следующими формулами.

Поскольку параметры навива одинаковы, уравнение линейного контакта запишется [1]:

$$\delta_k = 2 \cdot r \cdot \xi, \quad (1)$$

где  $r$  – расстояние от начала координат до оси каната в поперечном сечении;  $\xi$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от количества армирующих элементов и угла их навива.

После проведения преобразований соответствующего выражения для параметра  $r$  через внутренний и наружный диаметры трубы и подстановки в уравнение (1) по формулам М.Ф. Глушко [1] получим:

$$\delta_k = \frac{\xi \cdot d_H}{1 + \xi} = \frac{\xi \cdot d_B}{1 - \xi}, \quad (2)$$

где  $d_H$  – наружный диаметр трубы;  $d_B$  – внутренний диаметр трубы.

Для нахождения необходимого диаметра армирующих элементов при тангенциальном контакте необходимо задать параметры навива (число армирующих элементов, угол навива, наружный диаметр ПАТ без защитного полимерного покрытия) либо на основании вышеописанных формул решить обратную задачу с известным значением диаметра армирующего элемента вместо диаметра ПАТ. Перейдем к уравнениям для расчета параметров внутреннего армирующего слоя. В силу того что параметры навива внутреннего армирующего и наружного слоев различны, между ними будет возникать точечное взаимодействие (точечный контакт). К параметрам точечного контакта относится угол пролета  $\beta$ .

В результате математических преобразований (в данной статье не приводятся), с учетом условий взаимодействия наружного и внутреннего армирующих слоев, была получена следующая зависимость угла пролета от угла навива армирующих элементов и их числа:

$$\beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot m_2 \cdot \text{tg} \alpha_2}{\text{ctg} \alpha_1 + \text{ctg} \alpha_2}, \quad (3)$$

где  $\alpha_1$  – угол навива наружного армирующего слоя;

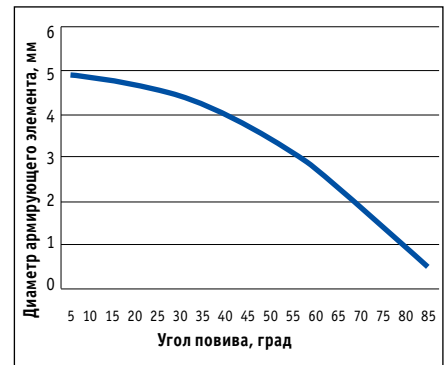


Рис. 2. Зависимость диаметра армирующего элемента от угла навива (число армирующих элементов в армирующем слое = 12)

$\alpha_2$  – угол навива внутреннего армирующего слоя;

$m_2$  – число проволок армирующего слоя.

В дальнейшем данная зависимость может использоваться для проведения расчетов напряжений, возникающих при контакте армирующих слоев, с нагружающим фактором и без него. Плотность распределения точек контакта по всей длине армирующего элемента влияет на равномерность распределения нагрузок по слою армировки и в конечном итоге – на условный модуль упругости трубы [1].

В зависимости от величины угла навива при прочих равных условиях (постоянное число армирующих элементов) изменяется диаметр армирующего элемента. С его уменьшением будет уменьшаться и грузонесущая способность ПАТ в целом (рис. 2).

При работе ПАТ с воздействием растягивающих сил при одинаковом числе армирующих элементов предпочтительнее их использование с большим диаметром. Из представленной графической зависимости (рис. 2) наибольшие значения диаметров находятся в пределах от 5 до 20° угла навивки, что и является оптимальной величиной.

Также, основываясь на результатах работы Г. Скуратова [5], в которых выявлена зависимость между параметрами навива армирующего элемента и условным модулем упругости полученной конструкции, с рядом допущений было использовано выражение для нахождения модуля упругости ПАТ в зависимости от варианта ее конструкции в

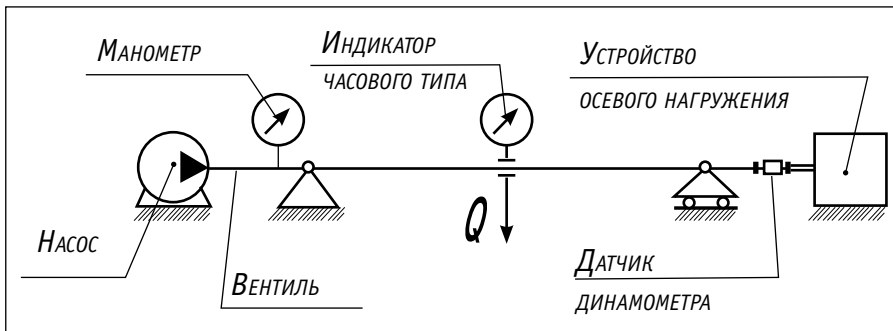


Рис. 3. Стенд для исследования поперечной жесткости полимерной армированной трубы

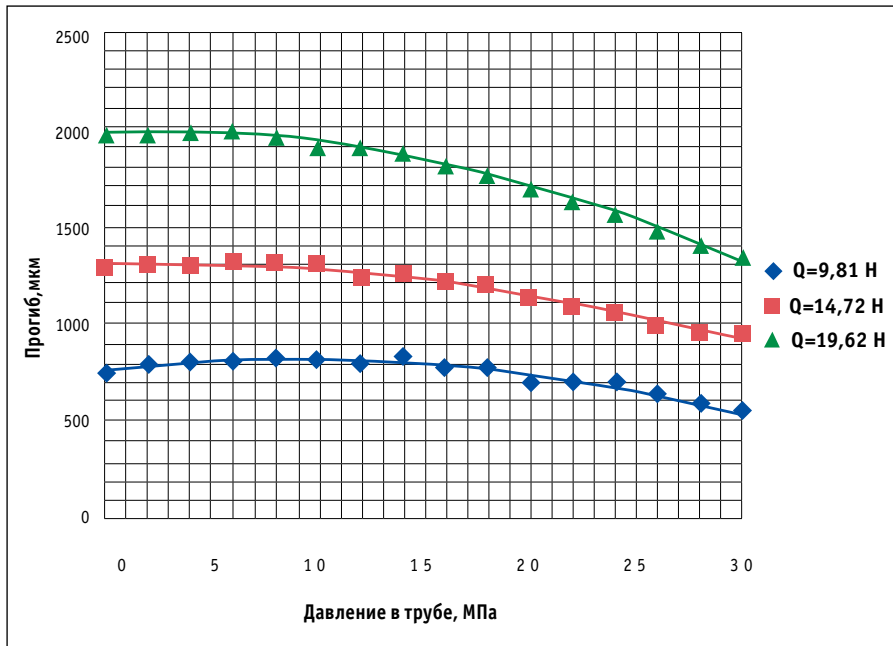


Рис. 4. Величина прогиба образца трубы ПАТ 5/15 от внутреннего давления в канале при действии поперечной силы Q

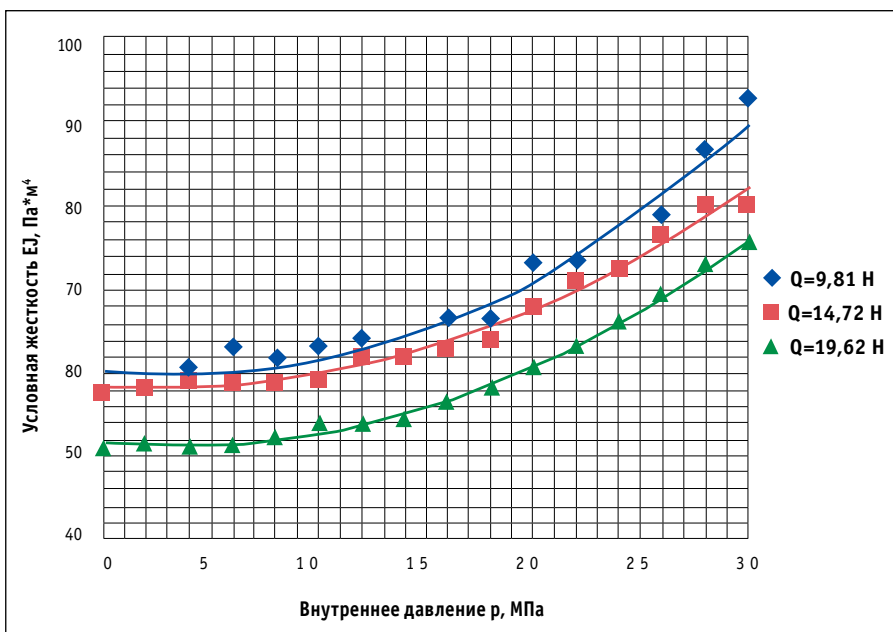


Рис. 5. Условная жесткость образца трубы ПАТ 5/15 от величины внутреннего давления в канале при действии поперечной силы Q

качестве уточненного выражения для последующих расчетов.

$$E_y = \frac{\Sigma E \cdot f \cdot \cos^3 \alpha}{\Sigma \frac{f}{\cos \alpha}}, \quad (4)$$

где  $E_y$  – условный модуль упругости первого рода для материала, из которого изготовлен армирующий элемент;  $f$  – площадь поперечного сечения армирующего элемента;  $\alpha$  – угол навива армирующего элемента. Очевидно, что наибольшие значения условного модуля упругости будут при стремлении значения  $\cos \alpha$  к 1.

Известно, что модуль упругости – это коэффициент пропорциональности, зависящий от материала, но в данном случае ПАТ не является однородной по своей структуре. Она состоит из нескольких материалов, по-разному реагирующих на нагрузки. Поэтому вводится понятие условного модуля упругости трубы. Данный вопрос уже рассматривался в работе, в которой была приведена методика определения условного модуля упругости ПАТ [3].

В работе [3] было описано наблюдение за изменением механических параметров трубы при предварительном нагружении. Поэтому авторами были проведены соответствующие исследования зависимости условной жесткости трубы при влиянии на нее внутреннего давления и осевой нагрузки. Основной целью было повышение механических параметров трубы без изменения ее конструкции. Исследования проводилось на образцах грузонесущей ПАТ 5/15 [6].

Для данных исследований был разработан стенд, состоящий из насоса, устройства осевого нагружения, манометра, часового индикатора и динамометра (рис. 3).

На стенде образец ПАТ нагружался внутренним давлением или растягивающей осевой нагрузкой. Затем прикладывалась поперечная сила Q и проводились замеры величины прогиба образца трубы при помощи часового индикатора. По результатам испытаний были получены графические зависимости влияния внутреннего давления: на величину прогиба (рис. 4), на изменение условной жесткости (рис. 5), на изменение условного

модуля упругости (рис. 6), а также влияния растягивающего усилия: на величину прогиба (рис. 7), на величину условной жесткости (рис. 8), на величину условного модуля упругости (рис. 9).

В соответствии с рисунком 4 можно говорить о том, что с ростом внутреннего давления в образце трубе при действии поперечной нагрузки (Q) наблюдается снижение прогиба от изначального положения. Заметное уменьшение величины прогиба наблюдается при внутреннем давлении в 10 МПа и продолжает падать с его ростом.

Полученные данные были обработаны при помощи составленного для исходной системы универсального уравнения упругой линии балки [2].

Как видно из рисунка 5, кривые изменения условной жесткости образца показывают прямую пропорциональную зависимость в исследуемом диапазоне. При внутреннем давлении в образце, превышающем 10 МПа, наблюдается значительное изменение жесткости в диапазоне от 51 до 81 Па\*м<sup>4</sup>.

Аналогично графику зависимости условной жесткости образца трубы от внутреннего давления зависимость условного модуля упругости образца (рис. 6) носит прямой пропорциональный характер, его значения с ростом внутреннего давления колеблются в диапазоне 255–440 МПа. Другими словами, с увеличением давления в 6 раз условный модуль упругости возрастает в 1,5 раза.

Помимо внутреннего давления влияние на механические характеристики оказывает и осевое усилие (T), которым нагружена труба.

При действии растягивающей осевой нагрузки наблюдается изменение прогиба образца в сторону уменьшения (рис. 7), причем наибольшее изменение находится в диапазоне 1,3–4,0 кН. При величине осевой нагрузки в 5,5 кН прогиб уменьшился практически в 10 раз по сравнению с ненагруженным образцом трубы.

Значения условной жесткости и условного модуля упругости образца представлены в виде следующих графических зависимостей.

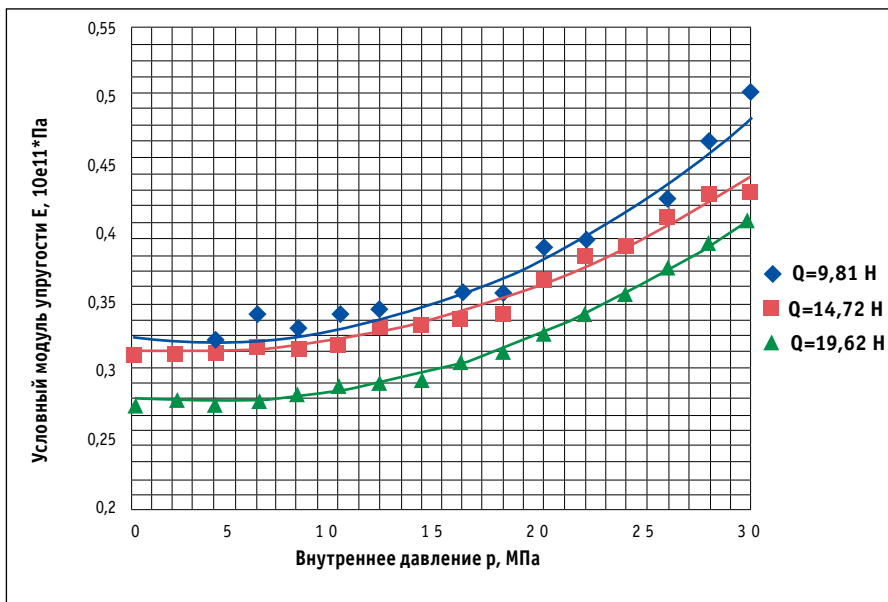


Рис. 6. Условный модуль упругости образца трубы ПАТ 5/15 от величины внутреннего давления в канале при действии поперечной силы Q

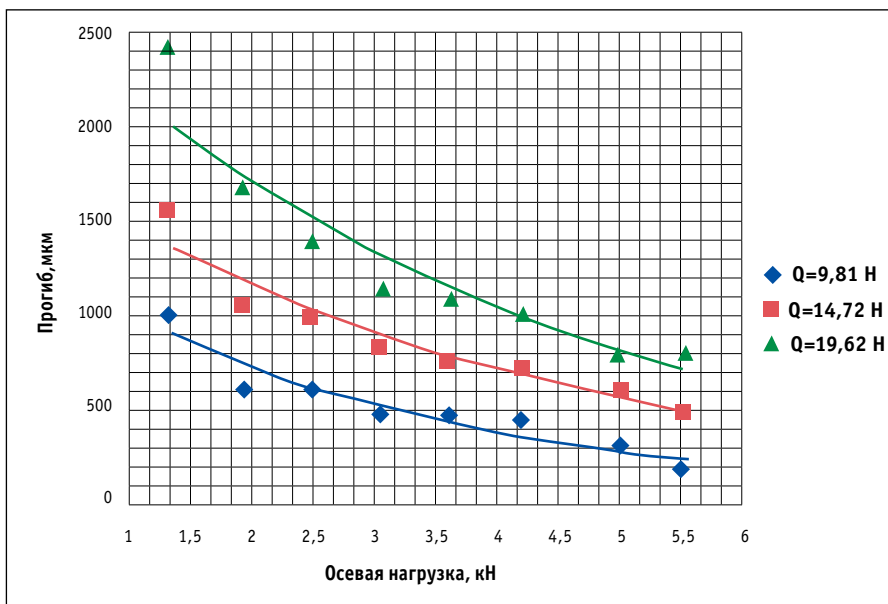


Рис. 7. Величина прогиба образца трубы ПАТ 5/15 от значения осевого усилия (T) при действии поперечной силы Q

Как показано на рисунке 8, диапазон изменения условной жесткости колеблется от 40 до 170 Па\*м<sup>4</sup>. Сама зависимость носит прямой пропорциональный характер. Изменение условной жесткости при растягивающей осевой нагрузке происходит более интенсивно, чем при изменении величины внутреннего давления в исследуемых диапазонах. Можно предположить, что изменение осевого усилия в большей степени влияет на условную поперечную жесткость образца. При изменении осевой нагрузки изменение условного модуля упругости находится в диапазоне 250–925 МПа.

Таким образом, графики показывают, что, в соответствии с прямой пропорциональностью, с ростом значений нагружающих факторов наблюдается значительное возрастание значений поперечной жесткости и условного модуля упругости образца. Исходя из этого, можно говорить о том, что условная жесткость образца ПАТ зависит от усилий, воздействующих на него. Чем выше будут предварительные нагружающие факторы (растягивающее усилие или внутреннее давление), тем более жесткой становится конструкция (возрастает поперечная жесткость).

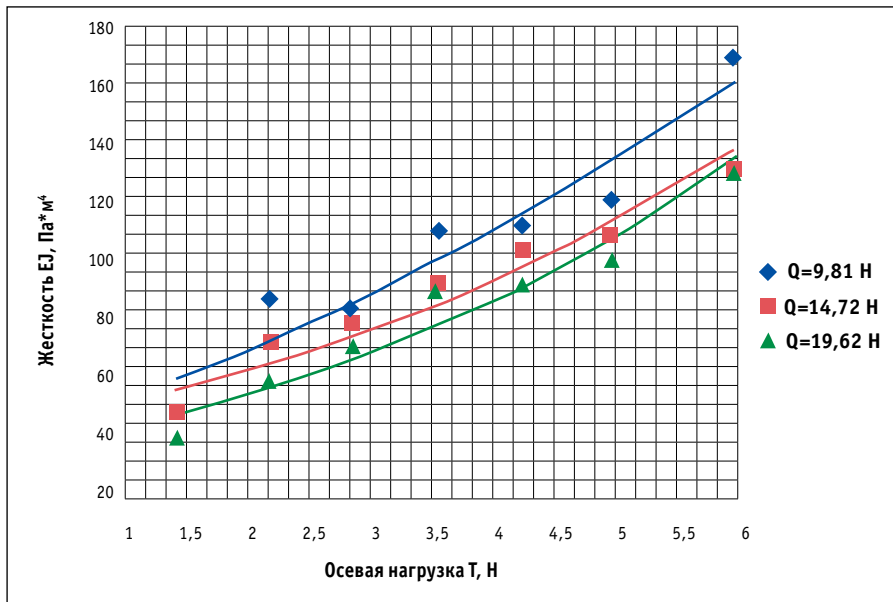


Рис. 8. Условная жесткость образца трубы ПАТ 5/15 от величины осевой нагрузки (Т) при действии поперечной силы Q

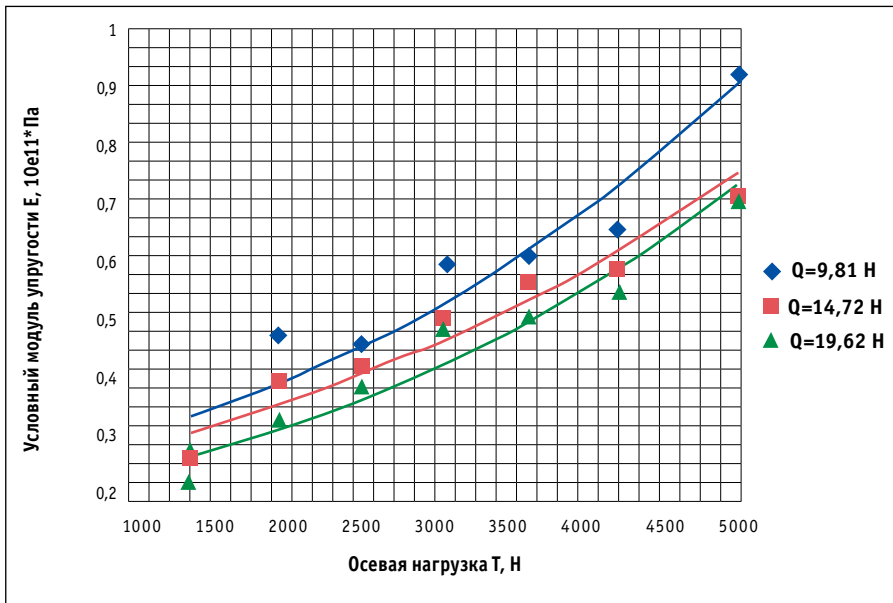


Рис. 9. Условный модуль упругости образца трубы ПАТ 5/15 от величины осевой нагрузки (Т) при действии поперечной силы Q

Следовательно, существует возможность изменения условных механических характеристик путем нагружения внешними силами.

## ВЫВОДЫ

1. Представлены зависимости диаметра армирующего элемента, условного модуля упругости от угла навива. Навив под углом 5–20° обеспечивает наибольший показатель условной жесткости и больший диаметр армирующего элемента.
2. Разработан стенд для проведения исследований зависимости прогиба, условной жесткости и модуля упругости от внутреннего давления и растягивающей нагрузки.
3. В исследуемом диапазоне внутреннего давления (0–30 МПа) и растягивающей нагрузки (1000–5000 Н) наблюдается прямая пропорциональная зависимость роста условных жесткости (40–170 Па\*м<sup>4</sup>) и модуля упругости (225–925 МПа).

## ЛИТЕРАТУРА:

1. Глушко М.Ф. Стальные подъемные канаты. – Киев: Техніка, 1966. – 328 с.
2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Наука, 1967. – 552 с.
3. Людвиницкая А.Р., Шайдаков В.В., Паливода Р.Б., Чернова К.В., Халилов А.А. Упругопрочностные свойства полимерных армированных трубопроводов, используемых в нефтегазопромысловом оборудовании // Территория НЕФТЕГАЗ. – 2012. – № 9.
4. Шайдаков В.В., Пензин А.В., Антоненко А.А., Шайдаков Е.В., Габидуллин Ш.Р. Непрерывная штанговая колонна для скважинных глубинно-насосных установок // Нефть. Газ. Новации. – 2011. – № 8.
5. Скуратов Г. Модуль упругости стальных подъемных канатов // Горный журнал. – 1927. – № 4.
6. www.incompneft.ru.

## Pipe valves

A.A. Antonenko, postgraduate, academic centre «Geophysic», e-mail: andr-antonen@yandex.ru; V.V. Shaidakov, doctor of engineering, professor, e-mail: v1v2sh50@yandex.ru; A.R. Lyudvinitzskaya, candidate of engineering, associate professor, Ufa State Petroleum Technological University, e-mail: ljudvinickaja@yandex.ru

## Research on mechanical properties of fiber reinforced polymer pipe

In the article the results of research on the change in mechanical properties of fiber reinforced polymer pipe (PAT). Describes the dependence of the diameter of the reinforcing element, the apparent modulus of elasticity of the angle-spiral. Described bench installation used for research. Test results carried out according to conventional hardness and modulus values of the internal pressure and axial tension load. Presents a graph of the diameter of the reinforcing elements of the angle-spiral, and the mechanical characteristics of the loading from external forces.

**Keywords:** reinforced polymer pipe, rigidity test, conditional modulus, helix angle, reinforcing element.

## References:

1. Glushko M.F. Stal'nye pod'emnye kanaty (Steel Hoisting Cables). – Kyiv: Technika, 1966. – P. 328.
2. Feodosiev V.I. Soprotivlenie materialov (Resistance of Materials). – M.: Nauka, 1967. – P. 552.
3. Lyudvinnitskaya A.R., Shaydakov V.V., Palivoda R.B., Chernova K.V., Khalilov A.A. Uprugoprochnostnye svoystva polimernykh armirovannykh truboprovodov, ispol'zuemykh v neftegazopromyslovom oborudovanii (Elastic and Durable Properties of Reinforced Polymeric Pipelines Used in Oil and Gas Industrial Equipment) // Territory NEFTEGAZ. – 2012. – # 9.
4. Shaydakov V.V., Penzin A.V., Antonenko A.A., Shaydakov E.V., Gabidullin Sh.R. Nepreryvnaya shtangovaya kolonna dlya skvazhinnykh glubinno-nasosnykh ustanovok (Continuous Rod String for Deep Well Pumping Units) // Oil. Gas. Novations. – 2011. – # 8.
5. Skuratov G. Modul' uprugosti stal'nykh pod'emnykh kanatov (Elasticity Modulus of Steel Hoisting Cables) // Gornyi Zhurnal. – 1927. – # 4.
6. Web-site: www.incompneft.ru.