

DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-671-685

UDC 622.692

## Modeling flexibility of nanocomposite pipelines

### Authors:

#### Igor R. Baikov,

Doctor of Engineering, Professor, Ufa State Petroleum Technological University;  
Russia, Bashkortostan Republic, Ufa, pte.ugntu@rusoil.net

#### Olga V. Smorodova,

PhD in Engineering, Associate Professor, Ufa State Petroleum Technological University;  
Russia, Bashkortostan Republic, Ufa, olga\_smorodova@mail.ru

#### Vadim R. Baibakov,

Undergraduate student, Ufa State Petroleum Technological University;  
Russia, Bashkortostan Republic, Ufa, vadim-rishatovich@mail.ru

**Abstract:** Pipes for oil and gas pipelines made of nanocomposite materials are increasingly used. The most common manufacture of composite piping is by winding fiberglass onto a rotating mandrel. With continuous winding, it is possible to choose the angle of laying the threads – the so-called angle of reinforcement. Depending on its value, as well as on the angle of curvature of the pipeline when its axis deviates from the straight direction, the strength indicators of the pipe change.

The article discusses the modeling of the flexibility behavior of a composite pipeline of a curved shape. It is curved pipelines that are in the most difficult operating conditions, accompanied by the manifestation of the Karman effect in the pipe turning angles. As a modeling parameter, a coefficient of increase in the flexibility of the pipe is adopted. Influencing factors are the angle of reinforcement of the composite and the angle of curvature of the axis of the pipeline. An analysis of the results of the calculation performed earlier showed that in the range of reinforcement angles from 0° to 85° the dynamics of the coefficient of increase in pipe flexibility is different. Mathematical models have been developed for two ranges of values for the coefficient of increase in the flexibility of a composite pipe. Modeling error averages no more than 2%.

**Keywords:** composite, flexibility, multi-parameter regression, modeling, asymptotic coordinates.

**For citation:** Baikov I.R., Smorodova O.V., Baibakov V.R. Modeling flexibility of nanocomposite pipelines. Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction. 2019, Vol. 11, no. 6, pp. 671–685. DOI: 10.15828/2075-8545-2019-11-6-671-685.

### Machine-readable information on CC-licenses (HTML-code) in metadata of the paper

```
<a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/"></a><br /><span xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://purl.org/dc/dcmitype/Text" property="dct:title" rel="dct:type">Modeling flexibility of nanocomposite pipelines</span> by <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a><br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/</a><br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a> is licensed under a <a rel="license" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">Creative Commons Attribution 4.0 International License</a><br />Based on a work at <a xmlns:dct="http://purl.org/dc/terms/" href="http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/" rel="dct:source">http://nanobuild.ru/en_EN/nanobuild-6-2019/</a><br />Permissions beyond the scope of this license may be available at <a xmlns:cc="http://creativecommons.org/ns#" href="http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
```

**The paper has been received by editors: 24.09.2019.**

**The paper has been received by editors after peer-review: 15.11.2019.**

**The paper has been accepted for publication: 21.11.2019.**



## INTRODUCTION

One of the main problems in maintaining the operability of technological pipeline systems is the corrosion of steel pipes. The most promising solution to this problem is the transition to non-metallic pipelines, for example, composite systems [1, 2, 3]. Currently, more than 200 thousand tons of pipes from composite materials (CM) are produced in the world [4]. Fiberglass pipes [5, 6, 7] are widely used, made on horizontal and radial cross winding machines using wet impregnation of glass-filled fiber with an epoxy binder [8].

The most common is the manufacture of composite pipes by the method of continuous winding of glass fiber on a stepwise moving mandrel [9] – the so-called «walking» mandrel. One of the available machine options is the regulation of the direction of glass-laying on the surface of the mandrel [10]. The winding path is determined by the angle of reinforcement  $\varphi$ . It is the angle between the direction of glass roving laying and the pipeline axis that largely determines the main characteristics of the strength and reliability of the composite pipe [11].

## MAIN PART

### The relevance of the task

The use of composite pipelines with a curved axis of laying is accompanied by the most complex technological strength modes. During their production, an inhomogeneous structure is formed with variable reinforcement angles  $\varphi$  (the angle between the tangent to the reinforcement path and the axial direction of the pipe). Pipeline zones in the area of rotation angles, as a rule, experience the greatest longitudinal and ring forces. With sufficient flexibility of the material, the probability of the manifestation of the Karman effect (flattening of the cross section during bending) is highest [12, 13]. The authors of [14] showed that the quality of installation and further operation of a composite pipe under variable temperature conditions largely depends on its rigidity. Increasing the flexibility of the pipe will ensure the reliability and durability of the pipeline system, even under conditions of accidental shock loads [15].

The work is devoted to modeling the coefficient of change in the flexibility of the pipeline depending on

Table 1

Initial values for the coefficient of increase in pipe flexibility  $k$

№	Reinforcement angle, $\varphi$ , °	Bend angle, $\Phi$ , °	Flexibility factor, $k$ , r.u.
	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	55	180	1.39
2	65	180	1.27
3	75	180	1.23
4	85	180	1.21
5	0	180	2.97
6	55	135	1.36
7	65	135	1.26
8	75	135	1.22
9	85	135	1.20
10	0	135	2.91
11	55	90	1.30
12	65	90	1.22
13	75	90	1.19
14	85	90	1.17
15	0	90	2.67
16	55	45	1.19
17	65	45	1.17
18	75	45	1.16
19	85	45	1.16
20	0	45	2.08

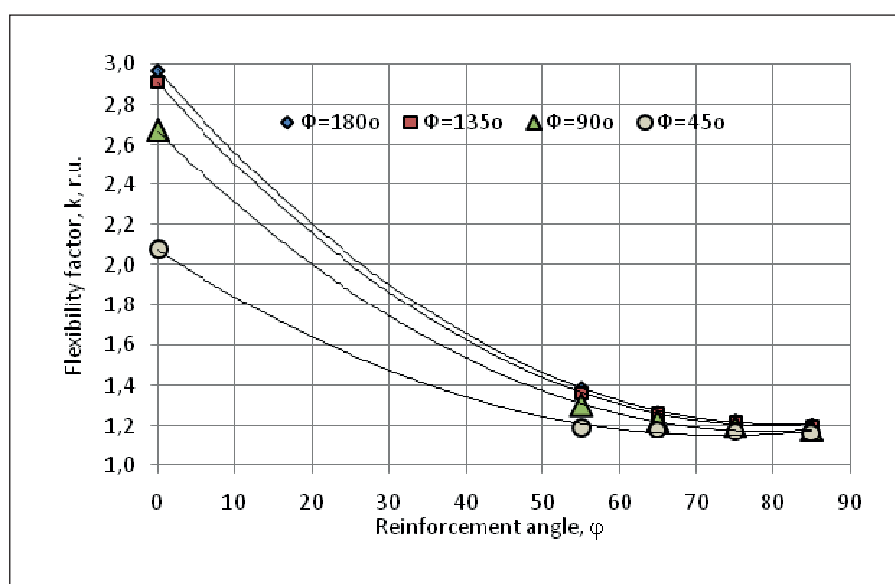


Fig. 1. The relationship of the coefficient of change in the flexibility of the KM pipe with reinforcement angles  $\varphi$  and bending  $\Phi$  of the pipeline

the bending angles of its axis  $\Phi$  and the angle of reinforcement  $\varphi$  [16]. The object of modeling is a pivotally supported curvilinear pipe made of Kevlar 49/PR-286 composite material with a diameter of 167 mm and a wall thickness  $h = 4.2$  mm. The number of layers is 6 [17].

#### Initial data for model development

The initial data for modeling the behavior of the coefficient of change in flexibility  $k$  were the results of the finite element method [18, 19] for calculating the strength characteristics of a curved pipe made of Kevlar-286 composite material (Table 1, Fig. 1).

An analysis of the source data showed that in the full range of variation of the reinforcement angle  $\varphi$  from  $0^\circ$  to  $85^\circ$ , the studied dependence is non-linearly monotonically decreasing for any curvature of the pipeline  $F$ .

#### Settlement part

Depending on the range of values of the angle of reinforcement  $\varphi$ , we selected modeling methods.

#### Modeling in the range of $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$

In the range of reinforcement angles from  $55^\circ$  to  $85^\circ$ , the dynamics of the coefficient of increase in pipe flexibility is almost linear (the average deviation does not exceed 5%). In addition, glass roving winding machines, used in practice, provide reinforcement angles in precisely this range [20]. This allows you to use a technically un-

complicated method for developing a multi-parameter linear regression model.

The main goal of multiple regression is to build a model with a large number of factors, while determining their combined effect on the modeled indicator. The implementation of the method in matrix form involves several consecutive steps.

Step 1. Formation of source data matrices for modeling:

$X$  – matrix of influencing parameters –  $\varphi$  and  $\Phi$  – taking into account the accepted number of influencing parameters.

$Y$  is the matrix of the desired function  $k$  is the coefficient of variation of the flexibility of the composite pipeline.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1 & \Phi_1 \\ 1 & \varphi_2 & \Phi_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \varphi_{15} & \Phi_{15} \\ 1 & \varphi_{16} & \Phi_{16} \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \dots \\ k_{15} \\ k_{16} \end{pmatrix}$$

Matrices are formed on the basis of the initial data of Table 1.

Step 2. Formation of the transposed matrix  $X^T$ .

$$X^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \varphi_1 & \varphi_2 & \dots & \varphi_{15} & \varphi_{16} \\ \Phi_1 & \Phi_2 & \dots & \Phi_{15} & \Phi_{16} \end{pmatrix}$$

Step 3. After a series of transformations of the original matrices, a vector of estimates of the coefficients of the regression equation is obtained:

$$A = (X^T \times X)^{-1} \times (X^T \times Y).$$

$$A = \begin{bmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}.$$

**Range modeling at  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$**

Expanding the range of variation of reinforcement angles in the manufacture of composite pipelines is a very promising direction. At  $\varphi \rightarrow 0^\circ$ , the coefficient of flexibility of the pipe increases significantly, which helps to increase the reliability and performance of a curved composite pipe [21]. To take into account the nonlinearity of the relationship between the coefficient of change in the flexibility of the pipeline with  $\varphi$  and  $\Phi$ , the transition to asymptotic variables seems optimal [22]. The authors of [22] showed that asymptotic variables can reliably develop a model of a function that is characterized by a tendency to some asymptotes at the boundaries of the considered range of values.

To pass to asymptotic variables, use the model function:

$$f = \frac{(k - k_0)}{(k_\infty - k_0)},$$

where  $k_0 = k(\Phi)$  at  $\varphi = \varphi_{\min} = 0^\circ$ ,  
 $k_\infty = k(\Phi)$  at  $\varphi = \varphi_{\max} = 85^\circ$ ,  
 for which  $\varphi_{\min}$  и  $\varphi_{\max}$  defined in Table 1. One-parameter regression equations for  $k_0$  and  $k_\infty$  set by least squares method.

The main property of the model function  $f$  is that for any values of the angle of curvature  $\Phi$   $f = 0$  at  $\varphi = \varphi_{\min}$ , and  $f = 1$  at  $\varphi = \varphi_{\max}$ .

The regression equation for  $f$  is established by its values by numerical simulation at values of the reinforcement angle  $\varphi$  in the range from  $0^\circ$  to  $85^\circ$ .

**Analysis of the results**

**Range simulation results at  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$**

As a result of the implementation of the matrix method for finding the coefficients in the multiple linear regression equation, the components of the vector of estimates of the coefficients of the equation were determined (table 2).

The result of the implementation of the multiple regression method under the condition  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$ , the type of dependence of the coefficient of flexibility of the pipeline depending on the angle of reinforcement

Table 2

**Coefficients of the linear equation of multiple regression to determine the coefficient of change in the flexibility of the composite pipeline**

№	Influence factor in the equation	Coefficient designation	The value of the coefficient of the regression equation
1	Free ratio	$A_0$	1.426
2	Reinforcement angle	$A_1$	-0.00405
3	Pipeline angle of curvature	$A_2$	0.000789

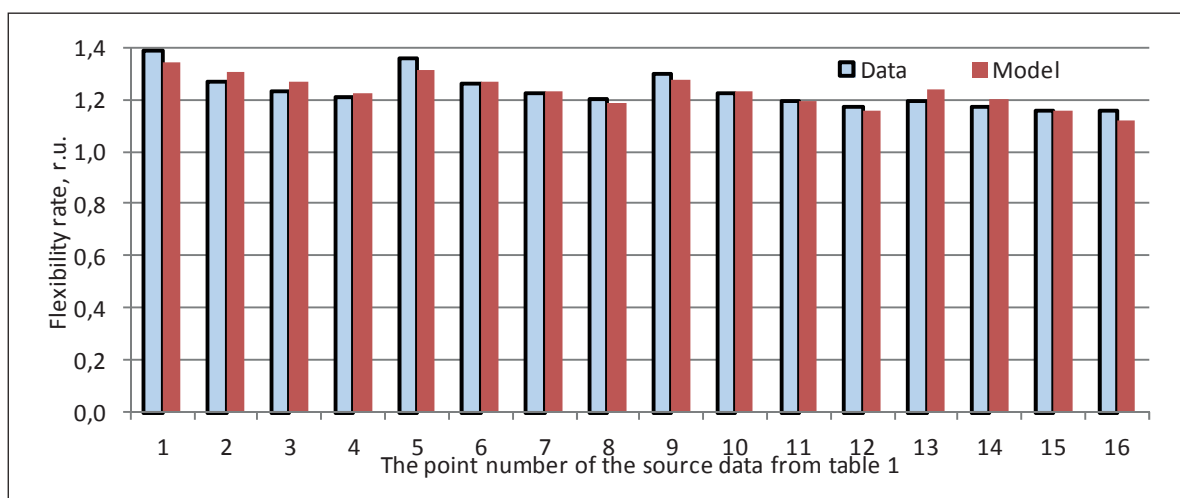


Fig. 2. Assessment of the reliability of the simulation results of the range  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$

$\varphi$  and the angle of curvature of the axis of the pipeline  $\Phi$  was established:

$$k(\varphi, \Phi) = 1,426 - 0,00405 \times \varphi + 0,000789 \times \Phi.$$

The adequacy of the obtained results was assessed by comparing the initial data of the values of the coefficient of flexibility increase of the composite pipeline with model values (Fig. 2).

A quantitative assessment of the quality of the resulting multiple regression equation showed that the modeling error at the points of the source data varies from 0,2% to 4%, averaging 1,9% for the sample.

**Range simulation results at  $\varphi \in [0^\circ; 85^\circ]$**

As shown in [22], the efficient use of asymptotic coordinates is possible for functions of a certain type. In particular, the direct application of asymptotic coordinates is inadmissible if  $F \rightarrow \infty$  is at least on one edge of the interval under study. In our case,  $k \rightarrow \infty$  for  $\varphi \rightarrow 0$  (Fig. 1).

This situation, according to the recommendations of the authors [23], is allowed by the transformation of the initial data of the form:

$$\bar{k} = 1/k.$$

The conversion results are given in Table 3.

The stages of the sequential implementation of the transition of the original function to asymptotic coordinates are shown in Fig. 3.

Taking into account the obtained analytical expression for the model function  $f$ , the dependence of the coefficient of increase in the flexibility of the composite pipe on the reinforcement angle  $\varphi$  and the pipe curvature angle  $\Phi$  was identified:

$$k(\varphi, \Phi) = 0,777\Phi^{0,265}[(0,002+0,0218\varphi-0,00012\varphi^2) \times (0,757\Phi^{0,233}-1)+1]^{-1},$$

where  $\varphi,^\circ$  – composite pipe reinforcement angle;  
 $\Phi,^\circ$  – pipeline axis curvature.

Table 3

Initial values for the coefficient of increase in pipe flexibility in converted format,  $\bar{k}$

$\bar{k}$	$\Phi = 180^\circ$	$\Phi = 135^\circ$	$\Phi = 90^\circ$	$\Phi = 45^\circ$
$\varphi = 0^\circ$	0.337	0.344	0.375	0.481
$\varphi = 55^\circ$	0.719	0.735	0.769	0.840
$\varphi = 65^\circ$	0.787	0.794	0.820	0.847
$\varphi = 75^\circ$	0.813	0.820	0.840	0.855
$\varphi = 85^\circ$	0.826	0.833	0.855	0.862

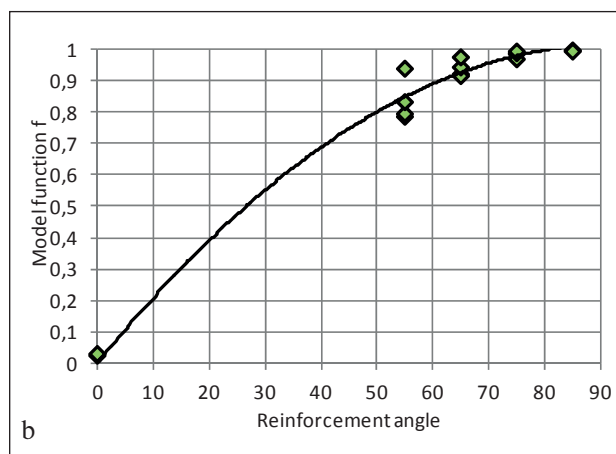
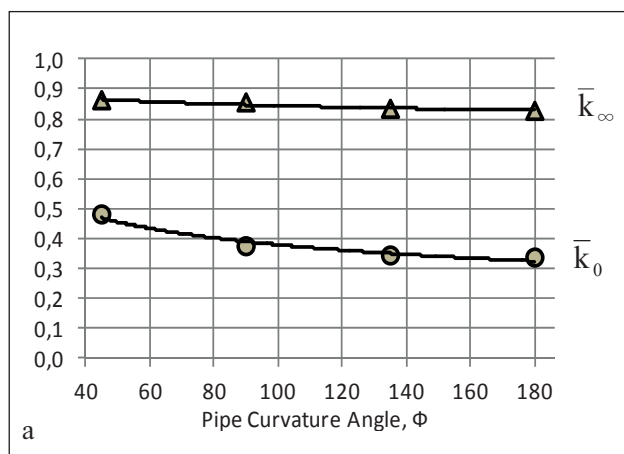


Fig. 3. Stages of the implementation of the asymptotic coordinate method:  
 a – boundary functions  $k_0$  and  $k_\infty$ ; b – model function

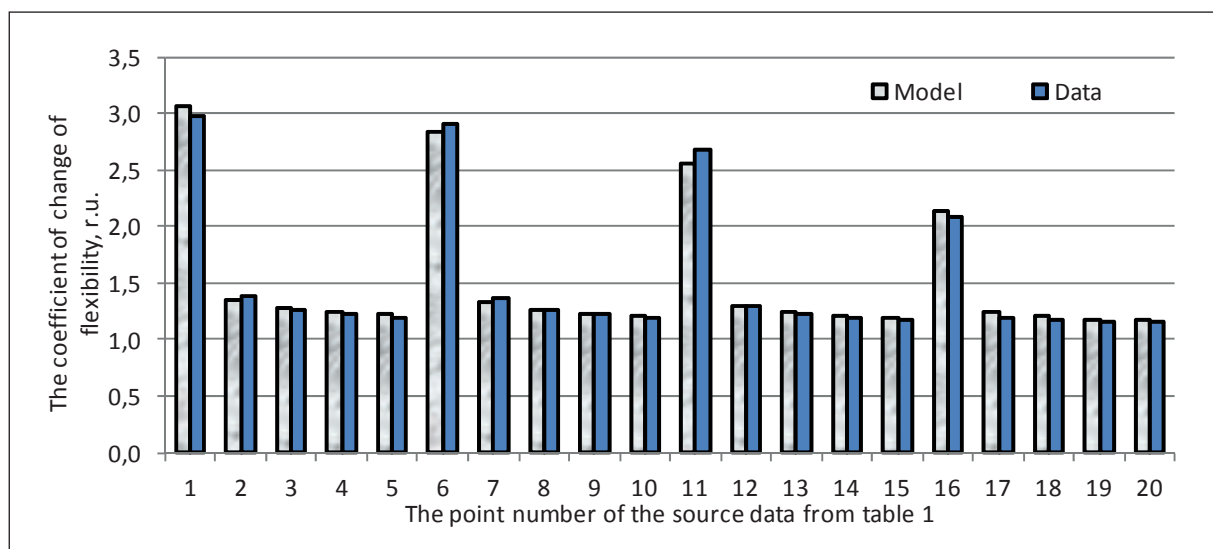


Fig. 4. Assessment of the reliability of the simulation results  $\varphi \in [0^\circ; 85^\circ]$

The adequacy of the obtained results was assessed by comparing the initial data of the values of the coefficient of flexibility increase of the composite pipeline with model values (Fig. 4).

A quantitative assessment of the adequacy of the obtained multiple regression equation showed that the modeling error at the points of the source data varies from 0.2% to 5%, averaging 2% on the sample.

## CONCLUSION

1. It is shown that an increase in the flexibility of the composite pipeline contributes to ease of installation and increases the reliability of the operation of the oil pipeline system.

2. It was found that the flexibility of the KM pipe increases with decreasing reinforcement angle. With a decrease in the angle of reinforcement from  $85^\circ$  to  $55^\circ$ , the dynamics of the coefficient of flexibility increase is almost linear. With a further decrease in the angle of reinforcement up to  $0^\circ$ , the intensity of the increase in the flexibility coefficient of the composite pipe gradually increases.

3. Developed regression equations to determine the coefficient of increase in the flexibility of the KM pipe depending on the angle of reinforcement and the angle of curvature of the pipeline: Non-linear model for  $\varphi \in [0^\circ; 85^\circ]$  and the linear model for  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$ . The average error of the models does not exceed 2%.



## ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных проблем поддержания работоспособности технологических трубопроводных систем является коррозия стальных труб. Наиболее перспективным решением этой проблемы представляется переход на неметаллические трубопроводы, например, композитные системы [1, 2, 3]. В настоящее время в мире производится более 200 тысяч тонн труб из композитных материалов (КМ) [4]. Широко применяются стеклопластиковые трубы [5, 6, 7], изготовленные на станках горизонтальной и радиально-перекрестной намотки по технологии мокрой пропитки стеклонаполненного волокна эпоксидным связующим [8].

Наиболее распространено изготовление композитных труб способом непрерывной намотки стекловолокна на ступенчато движущуюся оправку [9] – так называемая «шагающая» оправка. Одной из доступных опций станков является регулирование направления укладки стеклоровинга на поверхности оправки [10]. Траектория намотки определяется

углом армирования  $\varphi$ . Именно угол между направлением укладки стеклоровинга и осью трубопровода во многом определяет основные характеристики прочности и надежности композитной трубы [11].

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Актуальность задачи

Использование композитных трубопроводов с криволинейной осью укладки сопровождается наиболее сложными технологическими прочностными режимами. При их производстве формируется неоднородная структура с переменными углами армирования  $\varphi$  (угол между касательной траектории армирования и осевым направлением трубы). Зоны трубопроводов в области углов поворота, как правило, испытывают наибольшие продольные и кольцевые напряжения. При достаточной гибкости материала вероятность проявления эффекта Кармана (сплющивания поперечного сечения при изгибе) наиболее высока [12, 13]. Авторами [14] показано,

Таблица 1

Исходные значения коэффициента увеличения гибкости трубы  $k$

№ п/п	Угол армирования, $\varphi$ , °	Угол изгиба оси, $\Phi$ , °	Коэффициент увеличения гибкости, $k$ , о.е.
	$X_1$	$X_2$	
1	55	180	1,39
2	65	180	1,27
3	75	180	1,23
4	85	180	1,21
5	0	180	2,97
6	55	135	1,36
7	65	135	1,26
8	75	135	1,22
9	85	135	1,20
10	0	135	2,91
11	55	90	1,30
12	65	90	1,22
13	75	90	1,19
14	85	90	1,17
15	0	90	2,67
16	55	45	1,19
17	65	45	1,17
18	75	45	1,16
19	85	45	1,16
20	0	45	2,08



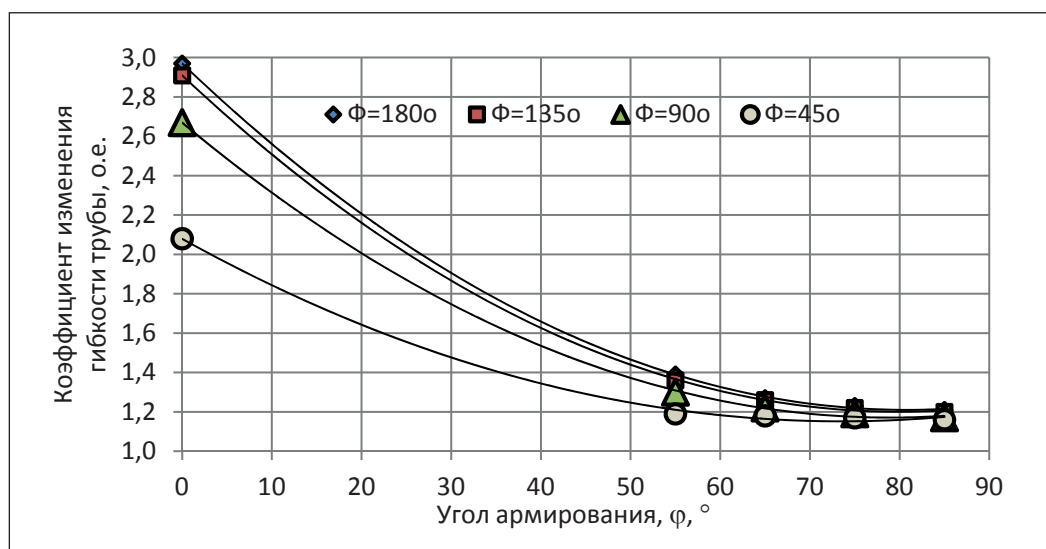


Рис.1. Взаимосвязь коэффициента изменения гибкости КМ-трубы с углами армирования φ и изгиба Φ трубопровода

что качество монтажа и дальнейшей эксплуатации композитной трубы в переменных температурных условиях во многом зависит от ее жесткости. Повышение гибкости трубы позволит обеспечить надежность и долговечность трубопроводной системы даже в условиях случайных ударных нагрузок [15].

Работа посвящена моделированию коэффициента изменения гибкости трубопровода в зависимости от углов изгиба его оси Φ и угла армирования φ [16]. Объектом моделирования является шарнирно-опертый криволинейный трубопровод из композитного материала Kevlar49/PR-286 диаметром 167 мм и толщиной стенки h = 4,2 мм. Количество слоев – 6 [17].

#### Исходные данные для разработки модели

Исходными данными для моделирования поведения коэффициента изменения гибкости k послужили результаты реализации метода конечных элементов [18, 19] для расчета характеристик прочности криволинейного трубопровода из композитного материала Kevlar49/PR-286 (табл. 1, рис. 1).

Анализ исходных данных показал, что в полном диапазоне изменения угла армирования φ от 0° до 85° изучаемая зависимость является нелинейной монотонно убывающей для любой кривизны трубопровода Φ.

#### Расчетная часть

В зависимости от диапазона значений угла армирования φ нами были подобраны методы моделирования.

#### Моделирование в диапазоне φ ∈ [55°; 85°]

В диапазоне значений углов армирования от 55° до 85° динамика коэффициента увеличения гибкости трубы является практически линейной (среднее отклонение не превышает 5%). Кроме того, применяемые на практике машины намотки стекловолокна обеспечивают углы армирования именно в таком диапазоне [20]. Это позволяет использовать несложный технический метод разработки многопараметрической линейной регрессионной модели.

Основная цель множественной регрессии – построить модель с большим числом факторов, определив при этом совокупное их воздействие на моделируемый показатель. Реализация метода в матричном виде подразумевает несколько последовательных шагов.

Шаг 1. Формирование матриц исходных данных для моделирования:

X – матрица влияющих параметров – φ и Φ – с учетом принятого количества влияющих параметров.

Y – матрица искомой функции k – коэффициента изменения гибкости композитного трубопровода.

$$X = \begin{pmatrix} 1 & \varphi_1 & \Phi_1 \\ 1 & \varphi_2 & \Phi_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & \varphi_{15} & \Phi_{15} \\ 1 & \varphi_{16} & \Phi_{16} \end{pmatrix}; \quad Y = \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ \dots \\ k_{15} \\ k_{16} \end{pmatrix}$$

Матрицы сформированы на основе исходных данных табл. 1.

Шаг 2. Формирование транспонированной матрицы  $X^T$ .

$$X^T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ \varphi_1 & \varphi_2 & \dots & \varphi_{15} & \varphi_{16} \\ \Phi_1 & \Phi_2 & \dots & \Phi_{15} & \Phi_{16} \end{pmatrix}$$

Шаг 3. После ряда преобразований исходных матриц получен вектор оценок коэффициентов уравнения регрессии:

$$A = (X^T \times X)^{-1} \times (X^T \times Y).$$

$$A = \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \end{pmatrix}.$$

### Моделирование в диапазоне $\varphi \in [0^\circ; 85^\circ]$

Расширение диапазона вариации углов армирования при изготовлении композитных трубопроводов является весьма перспективным направлением. При  $\varphi \rightarrow 0^\circ$  коэффициент гибкости трубы значительно возрастает, что способствует повышению

надежности и работоспособности криволинейной композитной трубы [21]. Для учета нелинейности функции взаимосвязи коэффициента изменения гибкости трубопровода с  $\varphi$  и  $\Phi$  оптимальным представляется переход к асимптотическим переменным [22]. Авторами [22] показано, что асимптотические переменные позволяют достоверно разрабатывать модель функции, которая характеризуется стремлением к некоторым асимптотам на границах рассматриваемого диапазона значений.

Для перехода к асимптотическим переменным используют модельную функцию:

$$f = \frac{(k - k_0)}{(k_\infty - k_0)},$$

где  $k_0 = k(\Phi)$  при  $\varphi = \varphi_{\min} = 0^\circ$ ,

$k_\infty = k(\Phi)$  при  $\varphi = \varphi_{\max} = 85^\circ$ ,

для которых  $\varphi_{\min}$  и  $\varphi_{\max}$  определены по табл. 1.

Однопараметрические уравнения регрессии для  $k_0$  и  $k_\infty$  установлены методом наименьших квадратов.

Главное свойство модельной функции  $f$  состоит в том, что при любых значениях угла кривизны  $\Phi f = 0$  при  $\varphi = \varphi_{\min}$ , и  $f = 1$  при  $\varphi = \varphi_{\max}$ .

Таблица 2

Коэффициенты линейного уравнения множественной регрессии для определения коэффициента изменения гибкости композитного трубопровода

№ п/п	Влияющий фактор в уравнении	Обозначение коэффициента	Значение коэффициента уравнения регрессии
1	Свободный коэффициент	$A_0$	1,426
2	Угол армирования	$A_1$	-0,00405
3	Угол кривизны трубопровода	$A_2$	0,000789

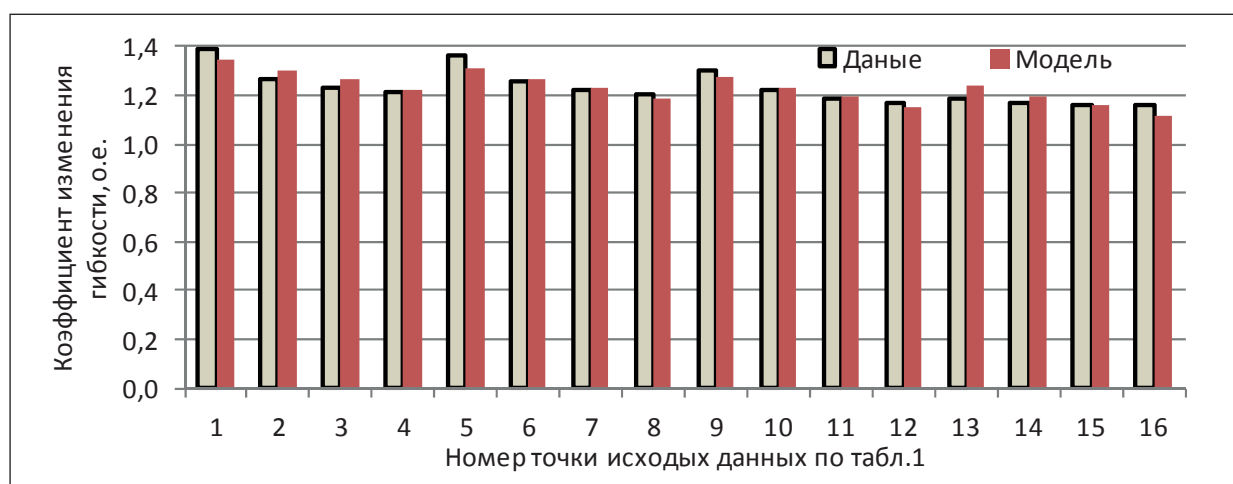


Рис. 2. Оценка достоверности результатов моделирования в диапазоне  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$

Уравнение регрессии для функции  $f$  устанавливают по ее значениям численным моделированием при значениях угла армирования  $\varphi$  в диапазоне от  $0^\circ$  до  $85^\circ$ .

### Анализ полученных результатов

#### Результаты моделирования в диапазоне $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$

В результате реализации матричного способа нахождения коэффициентов в уравнении множественной линейной регрессии были определены компоненты вектора оценок коэффициентов уравнения (табл. 2).

В результате реализации метода множественной регрессии при условии  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$  был установлен вид зависимости коэффициента изменения гибкости трубопровода в зависимости от угла армирования  $\varphi$  и угла кривизны оси трубопровода  $\Phi$ :

$$k(\varphi, \Phi) = 1,426 - 0,00405 \times \varphi + 0,000789 \times \Phi.$$

Оценка адекватности полученных результатов выполнена сравнением исходных данных значений

коэффициента увеличения гибкости композитного трубопровода с модельными величинами (рис. 2).

Количественная оценка качества полученного уравнения множественной регрессии показала, что ошибка моделирования по точкам исходных данных изменяется от 0,2% до 4%, составляя в среднем по выборке 1,9%.

#### Результаты моделирования в диапазоне $\varphi \in [0^\circ; 85^\circ]$

Как показано в [22], эффективное использование асимптотических координат возможно для функций определенного типа. В частности, недопустимо прямое применение асимптотических координат, если  $F \rightarrow \infty$  хотя бы на одном краю исследуемого интервала. В нашем случае  $k \rightarrow \infty$  при  $\varphi \rightarrow 0$ .

Эта ситуация по рекомендациям авторов [23] решается преобразованием исходных данных вида:

$$\bar{k} = 1/k.$$

Результаты преобразования приведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные значения коэффициента увеличения гибкости трубы в преобразованном формате,  $\bar{k}$

$\bar{k}$	$\Phi = 180^\circ$	$\Phi = 135^\circ$	$\Phi = 90^\circ$	$\Phi = 45^\circ$
$\varphi = 0^\circ$	0,337	0,344	0,375	0,481
$\varphi = 55^\circ$	0,719	0,735	0,769	0,840
$\varphi = 65^\circ$	0,787	0,794	0,820	0,847
$\varphi = 75^\circ$	0,813	0,820	0,840	0,855
$\varphi = 85^\circ$	0,826	0,833	0,855	0,862

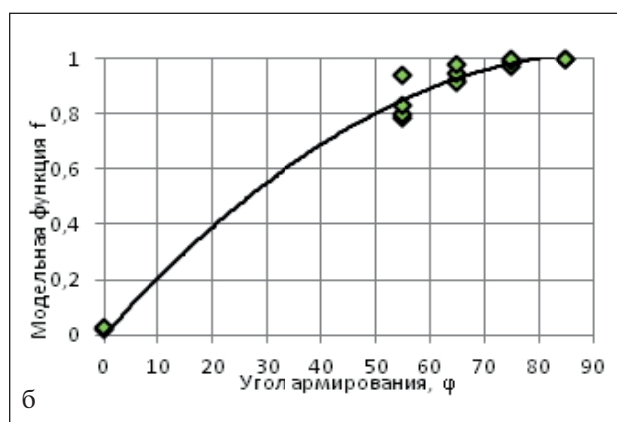
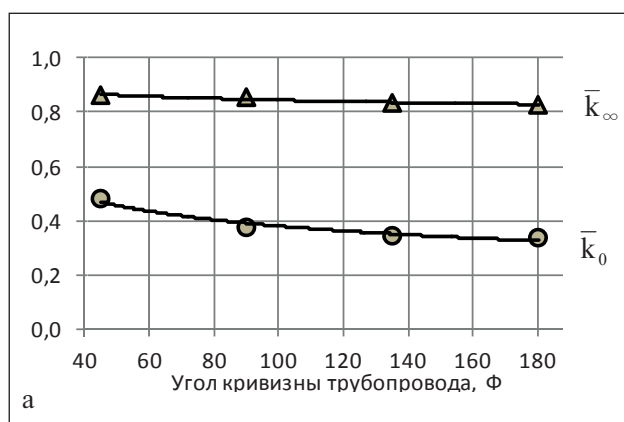


Рис. 3. Этапы реализации метода асимптотических координат:

а – граничные функции  $k_0$  и  $k_\infty$ ; б – модельная функция

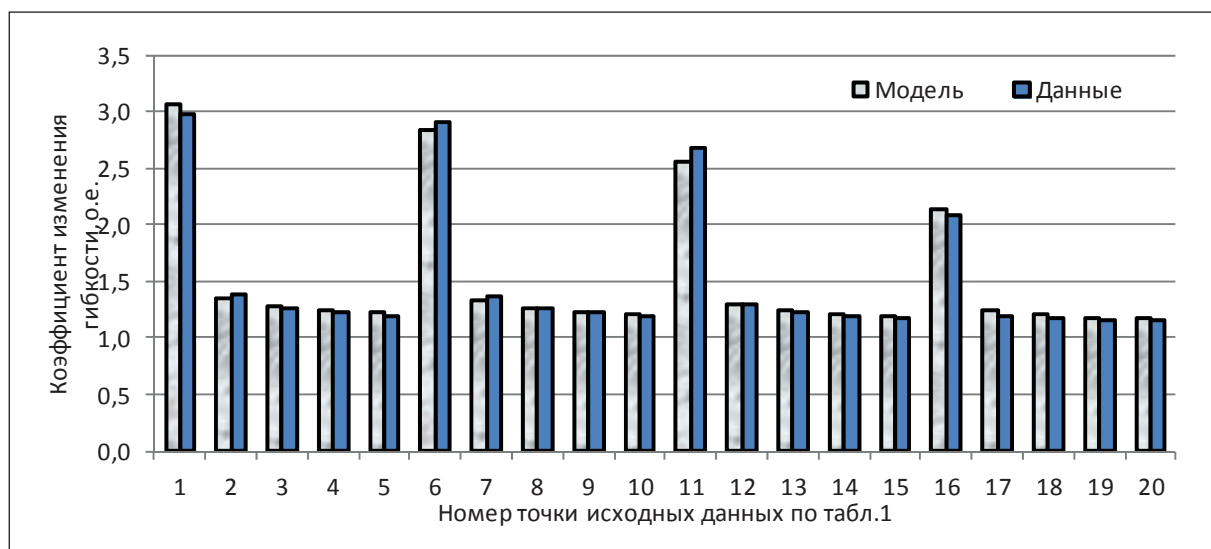


Рис. 4. Оценка достоверности результатов моделирования в диапазоне  $\varphi \in [0^\circ; 85^\circ]$

Этапы последовательной реализации перехода исходной функции к асимптотическим координатам показаны на рис. 3.

С учетом полученного аналитического выражения для модельной функции  $f$  была идентифицирована зависимость коэффициента увеличения гибкости композитной трубы от угла армирования  $\varphi$  и угла кривизны трубы  $\Phi$ :

$$k(\varphi, \Phi) = 0,777\Phi^{0,265}[(0,002+0,0218\varphi-0,00012\varphi^2) \times (0,757\Phi^{0,233}-1)+1]^{-1},$$

где  $\varphi^\circ$  – угол армирования композитного трубопровода;

$\Phi^\circ$  – угол кривизны оси трубопровода.

Оценка адекватности полученных результатов выполнена сравнением исходных данных значений коэффициента увеличения гибкости композитного трубопровода с модельными величинами (рис. 4).

Количественная оценка адекватности полученного уравнения множественной регрессии показала, что ошибка моделирования по точкам исходных

данных изменяется от 0,2 до 5%, составляя в среднем по выборке 2%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что увеличение гибкости композитного трубопровода способствует удобству монтажа и повышению надежности эксплуатации нефтепроводной системы.

2. Установлено, что гибкость КМ-трубы возрастает с уменьшением угла армирования. При снижении угла армирования от  $85^\circ$  до  $55^\circ$  динамика коэффициента увеличения гибкости практически линейна. При дальнейшем снижении угла армирования вплоть до  $0^\circ$  интенсивность увеличения коэффициента гибкости композитной трубы постепенно возрастает.

3. Разработаны уравнения регрессии для определения коэффициента увеличения гибкости КМ-трубы в зависимости от угла армирования и угла кривизны трубопровода: нелинейная модель для  $\varphi \in [0^\circ; 85^\circ]$  и линейная модель для  $\varphi \in [55^\circ; 85^\circ]$ . В среднем, ошибка моделей не превышает 2%.

## REFERENCES

1. Baikov I.R., Smorodova O.V., Kitaev S.V. Nanocomposite pipelines energy efficiency. *Nanotechnologies in Construction*. 2018, Vol. 10, no. 3, pp. 20–36. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-20-36](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-20-36). (In Russian).
2. Smorodova O.V., Kostareva S.N., Baykov I.R., Basharova L.R. Effektivnost' kompozitnykh truboprovodov dlya gazotransportnykh sistem [The effectiveness of composite pipelines for gas transmission systems]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoye delo* [Electronic scientific journal "Oil and Gas Business"]. 2019. No. 1. P. 201–217. (In Russian). Available at: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1\\_2019/ogbus\\_1\\_2019\\_p201-217.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2019/ogbus_1_2019_p201-217.pdf). (Accessed: 20.09.2019).
3. Zaytsev K. I. Primeneniye plastmassovykh trub na ob'yektakh gazovoy promyshlennosti [The use of plastic pipes at gas industry facilities]. *Stroitel'stvo truboprovodov* [Pipeline construction]. 1996. No. 3. P. 33–34.
4. Yagubov E.Z. Razrabotka printsiptov obespecheniya konstruktivnoy nadezhnosti neftegazoprovodnykh sistem na osnove korrozionnostoykikh kompozitnykh trub [Development of principles for ensuring the structural reliability of oil and gas pipeline systems based on corrosion-resistant composite pipes]. Diss. ... d-ra tekhn. nauk [Thesis for a Doctorate's degree]. Uhta, 2011. 319 p. (In Russian).
5. Bashar, M. Study of matrix micro-cracking in nanoclay and acrylic tri-block-copolymer modified epoxy/basalt fiber-reinforced pressure-retaining structures / M. Bashar, U. Sundararaj, P. Mertiny. *eXPRESS Polymer Letters*. 2011. V. 5. № 10. P. 882–896.
6. Harris B. *Fatigue in composites*. England: Woodhead Publish Lmt., 2003. 742 p.
7. Hsieh, T. H. The toughness of epoxy polymers and fibre composites modified with rubber microparticles and silica nanoparticles / T. H. Hsieh, A. J. Kinloch, K. Masania, S. J. Lee, A. C. Taylor, S. Sprenger. *Journal of Materials Science*. 2010. №45. P. 1193–1210.
8. Smorodova O.V., Kitaev S.V., Baikov I.R. Composite gas pipelines: prospects of energy conservation. *Journal of Physics: Conference Series* 2018. P. 012069. (In English). Available at: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1111/1/012069/pdf>(Accessed: 20.09.2019).
9. Kalinchev V.A., Makarov M.S. Namotannyestekloplastiki [Coiled fiberglass]. Moscow. Khimiya [Chemistry], 1986. 272 p. (In Russian).
10. Kolchinskiy YU.L. Izgotovleniye i montazh tekhnologicheskikh truboprovodov iz nemetallicheskih materialov [Production and installation of technological pipelines from non-metallic materials]. Moscow. Stroyizdat [Stroyizdat], 1976. 159 p. (In Russian).
11. Owen M.J. Failure of glass-reinforced plastics under single and repeated loading / M.J. Owen, R. Dukes. *Journal of Strain Analysis for engineering design*. 1967. Vol. 2. № 4. pp. 272–279.
12. Karimov E.Kh., Karimov O.Kh., Movsumzade E.M., Boev E.V. The influence of metal nanoparticles on the mechanical properties of composite materials. *Nanotechnologii v stroitel'stve = Nanotechnologies in Construction*. 2017, Vol. 9, no. 4, pp. 22–47. DOI: [dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-4-22-47](https://doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-4-22-47). (In Russian).
13. Kamershteyn A.G., Rozhdestvenskiy V.V., Ruchimskiy M.N. Raschety truboprovodov na prochnost'. Spravochnaya kniga [Strength calculations of pipelines. Reference book]. Moscow: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo neftyanoy-igorno-toplivnoy literatury [State Scientific and Technical Publishing House of Oil and Mining and Fuel Literature]. 1963. 423 p. (In Russian). Available at: <http://truboprovod.rф/static/books/2013/10/08/kamershtejn-raschet-magistralnyih-truboprovodov-na-prochnost-i-ustojchivost-1963.pdf> (Accessed: 20.09.2019).
14. Loskutov YU.V., Kulikov YU.A. Prochnost' izhostkost' krivolinyeynykh mnogoslonykh kompozitnykh trub pri chistom izgibe [Strength and stiffness of curved multilayer composite pipes with clean bending]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy* [Mechanics of composite materials and structures]. 2008. V. 14. No. 2. P. 157–164. (In Russian).
15. Loskutov YU.V., Kulikov YU.A., Shlychkov S.V., Temnova Ye.B. Uprugiye kharakteristiki mnogoslonykh krivolinyeynykh trub iz armirovannogo plastika [Elastic characteristics of multilayer curved pipes made of reinforced plastic]. *Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksiy* [Mechanics of composite materials and structures]. 2006. V. 12. No. 2. P. 219–233. (In Russian).
16. Vallons K., Adolphs G., Lucas P., Lomov S.V., Verpoest I. The influence of the stitching pattern on the internal geometry, quasi-static and fatigue mechanical properties of glass fibre non-crimp fabric composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 56. P. 272–279.
17. Hydro R.M. Epoxies toughened with triblock copolymers / R. M. Hydro, R. A. Pearson. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*. 2007. №45. P. 1470–1481.
18. Prodromou A.G., Lomov S.V., Verpoest I. The method of cells and the mechanical properties of textile composites. *Composite Structures*. 2011. Vol. 93. № 4. P. 1290–1299.
19. Korotkov A.V. Razrabotka metodiki rascheta parametro v dinamicheskoy ustoychivosti mnogoslonykh kompozitnykh truboprovodov letatel'nykh apparatov [Development of a methodology for calculating the dynamic stability parameters of multilayer composite aircraft pipelines]. Diss. ... kand. tekhn. nauk [Ph.D. thesis]. Yoshkar-Ola, 2011. 159 p. (In Russian).
20. Loskutov YU.V., Ivanov S.P., Bagautdinov I.N., Gizatullin R.G., Yegorov A.V. Vliyaniy eskhemy namotki na zhestkost' i napryazhennoye sostoyaniye mnogoslonykh krivolinyeynykh trub iz kompozitsionnykh materialov [The influence of the winding scheme on the stiffness and stress state of multilayer curved pipes made of composite materials]. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruksiy i sooruzheniy* [Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures]. 2011. No. 4. P. 57–63. (In Russian).
21. Loskutov YU.V. Prochnost' nefteprovodov iz armirovannykh plastikov [Strength of oil pipelines from reinforced plastics]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research]. 2013. No. 11-9. P. 1824–1828. (In Russian). Available at: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33464> (Accessed: 20.12.2019).



22. Dil'man V.V., Polyaniin A.D. Metody model'nykh uravneniy i analogiy v khimicheskoy tekhnologii [Methods of model equations and analogies in chemical technology]. Moscow: Khimiya [Chemistry], 1988. 304 p. (In Russian).

23. Baykov I.R., Zhdanova T.G., Gareyev E.A. Modelirovaniye tekhnologicheskikh protsessov truboprovodnogo transporta nefiti i gaza [Modeling of technological processes of pipeline transport of oil and gas]. Ufa: UNI [Ufa: UNI], 1994. 128 p. (In Russian).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байков И.Р., Смородова О.В., Китаев С.В. Энергетическая эффективность нанокompозитных трубопроводов // Нанотехнологии в строительстве. – 2018. – Т. 10, № 3. – С. 20–36. – DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2018-10-3-20-36 (дата обращения 20.09.2019).

2. Смородова О.В., Костарева С.Н., Байков И.Р., Башарова Л.Р. Эффективность композитных трубопроводов для газотранспортных систем // Нефтегазовое дело. – 2019. – № 1. – С. 201–217. – URL: [http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1\\_2019/ogbus\\_1\\_2019\\_p201-217.pdf](http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/1_2019/ogbus_1_2019_p201-217.pdf). (дата обращения 20.09.2019).

3. Зайцев К.И. Применение пластмассовых труб на объектах газовой промышленности // Строительство трубопроводов. – 1996. – № 3. – С. 33–34.

4. Ягубов Э.З. Разработка принципов обеспечения конструктивной надежности нефтегазопроводных систем на основе коррозионностойких композитных труб. – Дисс. ... д-ра техн. наук. – Ухта, 2011. – 319 с.

5. Bashar M. Study of matrix micro-cracking in nano clay and acrylic tri-block-copolymer modified epoxy/basalt fiber-reinforced pressure-retaining structures / M. Bashar, U. Sundararaj, P. Mertiny // eXPRESS Polymer Letters. 2011. V. 5. № 10. P. 882–896.

6. Harris B. Fatigue in composites. – England: Woodhead Publish Lmt., 2003. 742 p.

7. Hsieh T.H. The toughness of epoxy polymers and fibre composites modified with rubber microparticles and silica nanoparticles / T.H. Hsieh, A.J. Kinloch, K. Masania, S.J. Lee, A.C. Taylor, S. Sprenger // Journal of Materials Science. 2010. № 45. P. 1193–1210.

8. Smorodova O.V., Kitaev S.V., Baikov I.R. Composite gas pipelines: prospects of energy conservation // В сборнике: Journal of Physics: Conference Series 2018. С. 012069. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1111/1/012069/pdf> (дата обращения 20.09.2019).

9. Калинин В. А., Макаров М. С. Намотанные стеклопластики. – М.: Химия, 1986. – 272 с.

10. Колчинский Ю.Л. Изготовление и монтаж технологических трубопроводов из неметаллических материалов. – М.: Стройиздат, 1976. – 159 с.

11. Owen M. J. Failure of glass-reinforced plastics under single and repeated loading / M. J. Owen, R. Dukes // Journal of Strain Analysis for engineering design. 1967. Vol. 2. № 4. pp. 272–279.

12. Каримов Э.Х., Каримов О.Х., Мовсумзаде Э.М., Боев Е.В. Влияние наночастиц металла на механические характеристики композитных материалов // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. – 2017. – Т. 9, № 4. – С. 22–47. – DOI: dx.doi.org/10.15828/2075-8545-2017-9-4-22-47 (дата обращения: 20.09.2019).

13. Камерштейн А.Г., Рождественский В.В., Ручимский М.Н. Расчеты трубопроводов на прочность. Справочная книга. – М.: Государственное научно-техническое издательство нефтяной и горно-топливной литературы, 1963. – 423 с. – URL: <http://truboprovod.pf/static/books/2013/10/08/kamershtejn-raschet-magistralnyih-truboprovodov-na-prochnost-i-ustojchivost-1963.pdf> (дата обращения: 20.09.2019).

14. Лоскутов Ю.В., Куликов Ю.А. Прочность и жесткость криволинейных многослойных композитных труб при чистом изгибе // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 157–164.

15. Лоскутов Ю.В., Куликов Ю.А., Шлычков С.В., Темнова Е.Б. Упругие характеристики многослойных криволинейных труб из армированного пластика // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2006. – Т. 12, № 2. – С. 219–233.

16. Vallons K., Adolphs G., Lucas P., Lomov S.V., Verpoest I. The influence of the stitching pattern on the internal geometry, quasi-static and fatigue mechanical properties of glass fibre non-crimp fabric composites // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2014. Vol. 56. P. 272–279.

17. Hydro R.M. Epoxies toughened with triblock copolymers [Текст] / R.M. Hydro, R.A. Pearson // Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics. 2007. № 45. P. 1470–1481.

18. Prodromou A.G., Lomov S.V., Verpoest I. The method of cells and the mechanical properties of textile composites // Composite Structures. 2011. Vol. 93. № 4. P. 1290–1299.

19. Коротков А.В. Разработка методики расчета параметров динамической устойчивости многослойных композитных трубопроводов летательных аппаратов. – Дисс. ... канд. техн. наук. – Йошкар-Ола, 2011. – 159 с.

20. Лоскутов Ю.В., Иванов С.П., Багаутдинов И.Н., Гизатуллин Р.Г., Егоров А.В. Влияние схемы намотки на жесткость и напряженное состояние многослойных криволинейных труб из композиционных материалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2011. – № 4. – С. 57–63.

21. Лоскутов Ю.В. Прочность нефтепроводов из армированных пластиков // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 11-9. – С. 1824–1828. – URL: <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=33464> (дата обращения: 20.12.2019).

22. Дильман В.В., Полянин А.Д. Методы модельных уравнений и аналогий в химической технологии. – М.: Химия, 1988. – 304 с.

23. Байков И.Р., Жданова Т.Г., Гареев Э.А. Моделирование технологических процессов трубопроводного транспорта нефти и газа. – Уфа: УНИ, 1994. – 128 с.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Igor R. Baikov**, Ufa State Petroleum Technological University; 450064, Russia, Bashkortostan Republic, Ufa, Kosmonavtov St., 1, Doctor of Engineering, Professor, Full member of Academy of Mining Engineering, Head of Department «Industrial Heat Powering», [pte.ugntu@rusoil.net](mailto:pte.ugntu@rusoil.net);

**Olga V. Smorodova**, Ufa State Petroleum Technological University; 450064, Russia, Bashkortostan Republic, Ufa, Kosmonavtov St., 1, PhD in Engineering, Associate Professor of Department «Industrial Heat Powering», [olga\\_smorodova@mail.ru](mailto:olga_smorodova@mail.ru);

**Vadim R. Baibakov**, Ufa State Petroleum Technological University; 450064, Russia, Bashkortostan Republic, Ufa, Kosmonavtov St., 1, Undergraduate student of Department «Transport and Storage of Oil and Gas», [vadim-rishatovich@mail.ru](mailto:vadim-rishatovich@mail.ru)

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Байков Игорь Равильевич**, д-р техн. наук, проф., действительный член Академии горных наук, зав. каф. «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; 450064, г. Уфа, Республика Башкортостан, ул. Космонавтов, д. 1, [pte.ugntu@rusoil.net](mailto:pte.ugntu@rusoil.net);

**Смородова Ольга Викторовна**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; 450064, г. Уфа, Республика Башкортостан, ул. Космонавтов, д. 1, [olga\\_smorodova@mail.ru](mailto:olga_smorodova@mail.ru);

**Байбаков Вадим Ришатович**, студент бакалавриата кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа», ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет»; 450064, г. Уфа, Республика Башкортостан, ул. Космонавтов, д. 1 [vadim-rishatovich@mail.ru](mailto:vadim-rishatovich@mail.ru)

CONTACTS / КОНТАКТЫ

e-mail: [olga\\_smorodova@mail.ru](mailto:olga_smorodova@mail.ru)