

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-6-59-66

УДК 622.692.4.07

**Вэй Бэй, Э.В. Мамлиев, Ф.М. Мустафин, Е.А. Лобова** (Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Российская Федерация)

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ПРОЕКТНОГО ПОЛОЖЕНИЯ ТРУБОПРОВОДА С УЧЕТОМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

**Wei Bei, Emil V. Mamliiev, Fanil M. Mustafin, Elizaveta A. Lobova**  
(Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation)

### STABILITY ENSURING OF PIPELINE DESIGN POSITION TAKING INTO ACCOUNT HYDRODYNAMIC IMPACTS

#### **Введение**

Большинство подводных участков трубопроводов на переходах через водные преграды теряют устойчивость и выходят из проектного положения или в период испытаний, или в первый год эксплуатации, или после длительной эксплуатации и частых остановок перекачки. Это подтверждает то, что при проектировании таких участков недоучтены вызывающие потерю устойчивости, например, гидродинамические или газодинамические воздействия.

#### **Цели и задачи**

Целью исследований является обеспечение стабильности проектного положения трубопровода от гидродинамического или газодинамического воздействия потока перекачиваемого продукта.

Для обеспечения стабильности проектного положения трубопровода на выпуклом участке профиля предлагается определять гидродинамическое или газодинамическое воздействие потока перекачиваемого продукта и осуществлять доballastировку трубопровода с учетом интенсивности гидродинамического или газодинамического воздействия.

#### **Background**

Most subsea pipeline sections at water crossings are unstable and move out of their design position either during the testing period or in the first year of operation, or after long operation and frequent pumping stops. This confirms that the design of such sections does not take into account loss of stability, such as hydrodynamic or gas-dynamic impacts.

#### **Aims and objectives**

The aim of the studies is to ensure the stability of the design position of the pipeline taking hydrodynamic or gas-dynamic effects of the pumped product flow.

For ensuring the stability of the design position of the pipeline in the convex section of the profile it is proposed to determine the hydrodynamic or gas-dynamic impact of the pumped product flow and to carry out the additional ballasting of the pipeline taking into account the intensity of hydrodynamic or gas-dynamic impact.

### Методы

Силы гидродинамического и газодинамического воздействий потока перекачиваемой среды на трубопровод определялись с использованием теории классической механики, теоремы импульса сил с учетом отпора от воздуха, теоремы импульса сил без учета отпора от воздуха и закона распределения скоростей потока.

### Результаты

На основании полученных зависимостей изменения вертикальной составляющей силы гидродинамического воздействия потока воды от угла поворота трубы установлено, что наименьшую погрешность линии тренда между экспериментальными и расчетными данными имеет график, построенный по результатам расчета по теореме импульсов с учетом отпора от воздуха.

### Methods

The forces of hydrodynamic and gas-dynamic influence of the pumped medium flow on the pipeline were determined with the use of the theory of classical mechanics, the theorems of force impulse taking into account the repulse from the air, the theorems of force impulse without taking into account the repulse from the air and the law of distribution of flow velocities.

### Results

On the basis of the received dependences of change of a vertical component of force of hydrodynamic influence of a water stream from a pipe turn angle it has been established that the least error of a trend line between experimental and calculated data has the graph built on calculated results of impulses theorem taking into account a repulse from air.

**Ключевые слова:** трубопровод; проектное положение; гидродинамическое воздействие; газодинамическое воздействие; подводный переход

**Key words:** pipeline; design position; hydrodynamic impact; gas-dynamic impact; underwater crossing

На сегодняшний день известен способ обеспечения стабильности проектного положения трубопровода, заключающийся в определении по продольному профилю стремящихся вывести из стабильного положения трубопровод нагрузок и воздействий и их уравнивании балластными грузами [1, 2].

Недостатком способа является возможность нарушения стабильности проектного положения трубопровода от гидродинамического или газодинамического воздействия потока перекачиваемого продукта.

На рисунке 1 представлена расчетная схема участка поворота оси трубопровода в вертикальной плоскости.

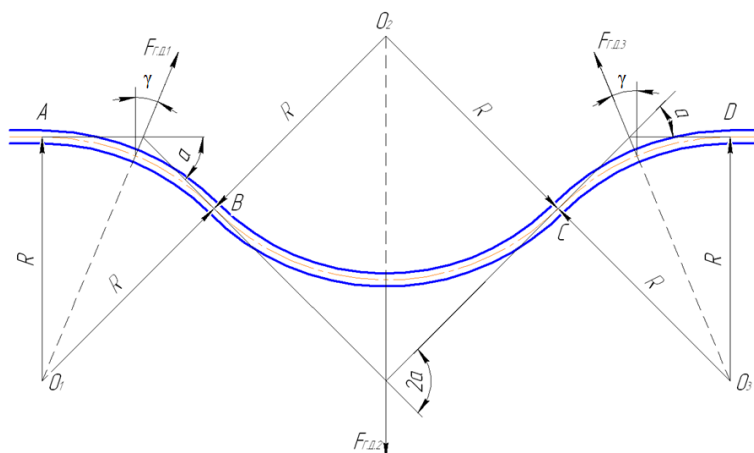


Рисунок 1. Расчетная схема участка поворота оси трубопровода в вертикальной плоскости

Величина силы гидродинамического или газодинамического воздействия определяется по формуле [3, 4]:

$$F_{г.д} = m \cdot a_{ц}, \quad (1)$$

где  $m$  - масса продукта, находящегося на участке поворота оси трубопровода;

$a_{ц}$  - центробежное ускорение продукта, находящегося на участке поворота оси трубопровода.

В случае если вертикальная проекция силы гидродинамического или газодинамического воздействия  $F_{г.д}^B$  направлена вниз (имеет место быть на вогнутых участках трубопровода ниже переломных точек В и С), то сама сила  $F_{г.д}$  работает на удержание трубопровода в проектном положении, и потому не учитывается (участок  $UBC$ ).

В случае если вертикальная проекция силы гидродинамического или газодинамического воздействия  $F_{г.д}^B$  направлена вверх (имеет место быть на участках трубопровода выше переломных точек В и С), то сама сила  $F_{г.д}$  стремится вывести трубопровод из проектного положения, потому необходимо учесть данное воздействие (участки  $UAB$  и  $UCD$ ) [5].

Величина  $m$  определяется по формуле [6]:

$$m = \int_0^{\alpha} \frac{\pi R}{180^\circ} \cdot S \cdot \rho_{пр} d\varphi = \int_0^{\alpha} \frac{\pi R}{180^\circ} \cdot \frac{\pi D_{вн}^2}{4} \cdot \rho_{пр} d\varphi = \int_0^{\alpha} \frac{\pi^2 D_{вн}^2 R}{720^\circ} \cdot \rho_{пр} d\varphi = \int_0^{\alpha} \frac{\pi^2 D_{вн}^2 R}{720^\circ} \cdot \rho_{пр} \varphi \Big|_0^{\alpha} = \frac{\pi^2 D_{вн}^2 R \rho_{пр} \alpha}{720^\circ}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  - угол поворота оси трубопровода;

$R$  - радиус поворота оси трубопровода;

$S$  - площадь проходного сечения трубопровода;

$D_{вн}$  - внутренний диаметр трубопровода;

$\rho_{пр}$  - плотность перекачиваемого продукта.

Величина  $a_{ц}$  определяется по формуле:

$$a_{ц} = \frac{v^2}{R}, \quad (3)$$

где  $v$  - средняя скорость потока продукта в трубопроводе.

Следовательно, силы гидродинамического или газодинамического воздействия [7]:

$$F_{г.д} = \frac{\pi^2 D_{вн}^2 R \rho_{пр} \alpha}{720^\circ} \cdot \frac{v^2}{R} = \frac{\pi^2 D_{вн}^2 \rho_{пр} \alpha v^2}{720^\circ}. \quad (4)$$

Нормативное значение интенсивности гидродинамического или газодинамического воздействия потока перекачиваемого продукта на трубопровод определяется как:

$$q_{г.д}^H = \frac{F_{г.д}}{L} = \frac{F_{г.д}}{\frac{\pi R}{180^\circ} \cdot \alpha} = \frac{\frac{\pi^2 D_{вн}^2 \rho_{пр} \alpha v^2}{720^\circ}}{\frac{\pi R}{180^\circ} \cdot \alpha} = \frac{\pi D_{вн}^2 \rho_{пр} v^2}{4R}, \quad (5)$$

где  $L$  - длина трубопровода на участке поворота.

Расчетное значение интенсивности гидродинамического или газодинамического воздействия потока перекачиваемого продукта на трубопровод определяется как:

$$q_{г.д} = q_{г.д}^H \cdot n_{пр} = \frac{\pi D_{вн}^2 \rho_{пр} v^2}{4R} \cdot n_{пр}, \quad (6)$$

где  $n_{пр}$  - коэффициент надежности по нагрузке от веса продукта,  $n_{пр}=1,0$ .

Для определения величины нормативной интенсивности балластировки  $q_{г.д}^H$  необходима лишь вертикальная составляющая величины расчетной интенсивности гидродинамического или газодинамического воздействия потока перекачиваемого продукта на трубопровод  $q_{г.д}^B$ :

$$q_{г.д}^B = q_{г.д} \cdot \cos \gamma = \frac{\pi D_{вн}^2 \rho_{пр} v^2}{4R} \cdot n_{пр} \cdot \cos \gamma, \quad (7)$$

где  $\gamma$  - угол отклонения силы  $F_{г.д}$  от вертикали.

Для конкретного участка газопровода с наружным диаметром  $D_{н} = 1020$  мм, толщиной стенки  $\delta = 14$  мм, внутренним диаметром  $D_{вн} = 992$  мм, углом изгиба круговой кривой  $\alpha = 15^\circ$ , средней скоростью течения продукта в процессе эксплуатации  $v = 30$  м/с, плотностью продукта  $\rho_{пр} = 70,1$  кг/м<sup>3</sup>, одиночные чунные кольцевые грузы массой  $Q_r = 1100$  кг:

$$F_{г.д1} = F_{г.д3} = \frac{\pi^2 D_{вн}^2 \rho_{пр} \alpha v^2}{720^\circ} = \frac{\pi^2 \cdot 0,992^2 \cdot 70,1 \cdot 15^\circ \cdot 30^2}{720^\circ} = 12763,8 \text{ Н}$$

$$q_{г.д1} = q_{г.д3} = \frac{\pi \cdot 0,992^2 \cdot 70,1 \cdot 30^2}{4 \cdot 1000} \cdot 1,0 = 48,75 \frac{\text{Н}}{\text{М}}$$

$$q_{г.д1}^p = q_{г.д3}^p = q_{г.д} \cdot \frac{\cos \alpha}{2} = 48,75 \cdot \cos \frac{15^\circ}{2} = 48,33 \frac{\text{Н}}{\text{М}}$$

Количество одиночных кольцевых чугунных пригрузов с учетом газодинамического воздействия потока продукта на трубопровод N = 884 шт., без учета газодинамического воздействия потока продукта на трубопровод N = 882 шт.

Большинство подводных участков трубопроводов на переходах через водные преграды теряют устойчивость и выходят из проектного положения или в период испытаний, или в первый год эксплуатации, или после длительной эксплуатации и частых остановок перекачки. Это подтверждает то, что при проектировании таких участков недоучтены вызывающие потерю устойчивости, например, гидродинамические или газодинамические воздействия [8-10].

Силы гидродинамического и газодинамического воздействий потока перекачиваемой среды на трубопровод определялись с использованием теории классической механики, теоремы импульса сил с учетом отпора от воздуха, теоремы импульса сил без учета отпора от воздуха и закона распределения скоростей потока [11]. Результаты расчетов по данным теориям, а также результаты эксперимента представлены на графиках, изображенных на рисунках 2-4.

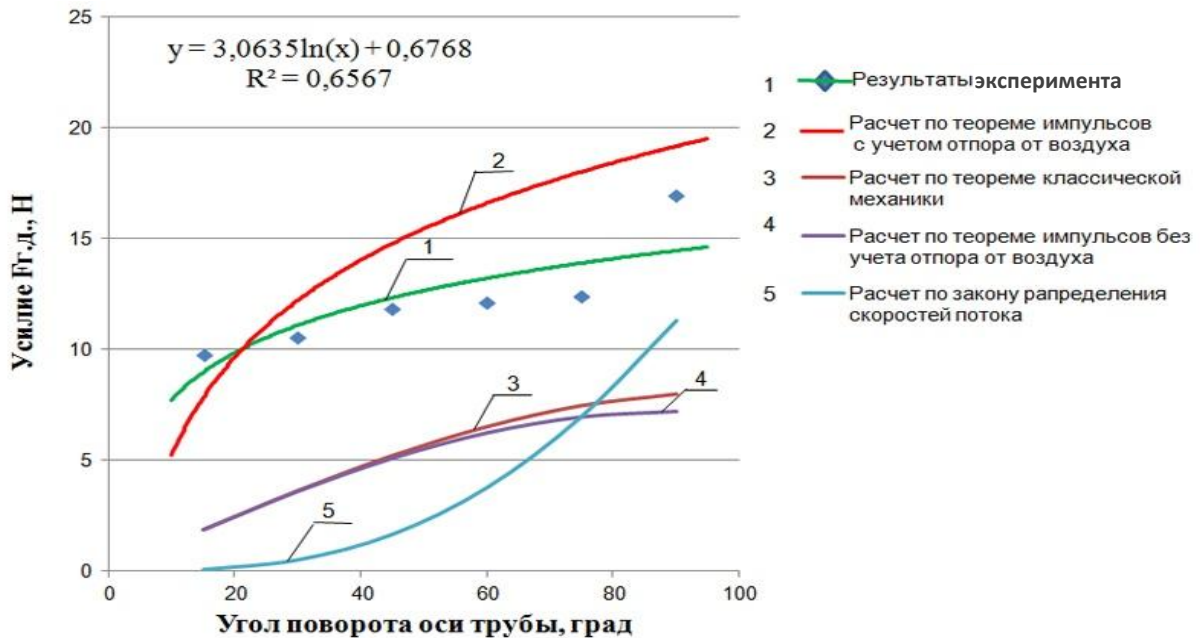


Рисунок 2. Графики изменения вертикальной составляющей силы гидродинамического воздействия потока воды от угла поворота трубы диаметром  $D_{вн} = 0,0125$  м

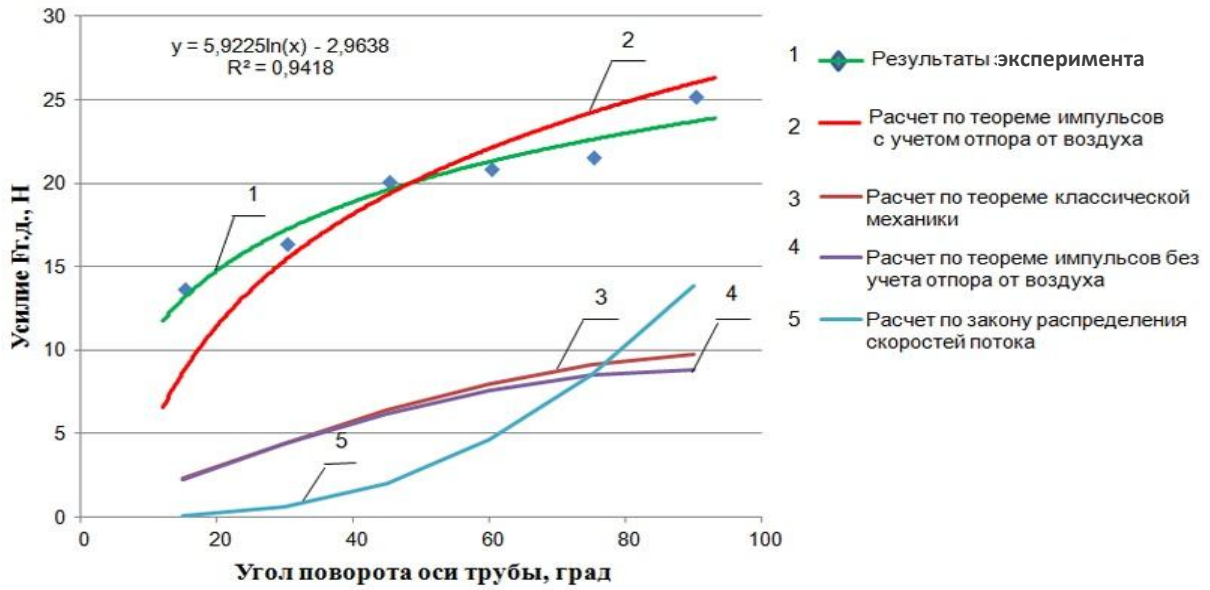


Рисунок 3. Графики изменения вертикальной составляющей силы гидродинамического воздействия потока воды от угла поворота трубы диаметром  $D_{ВН} = 0,019$  м

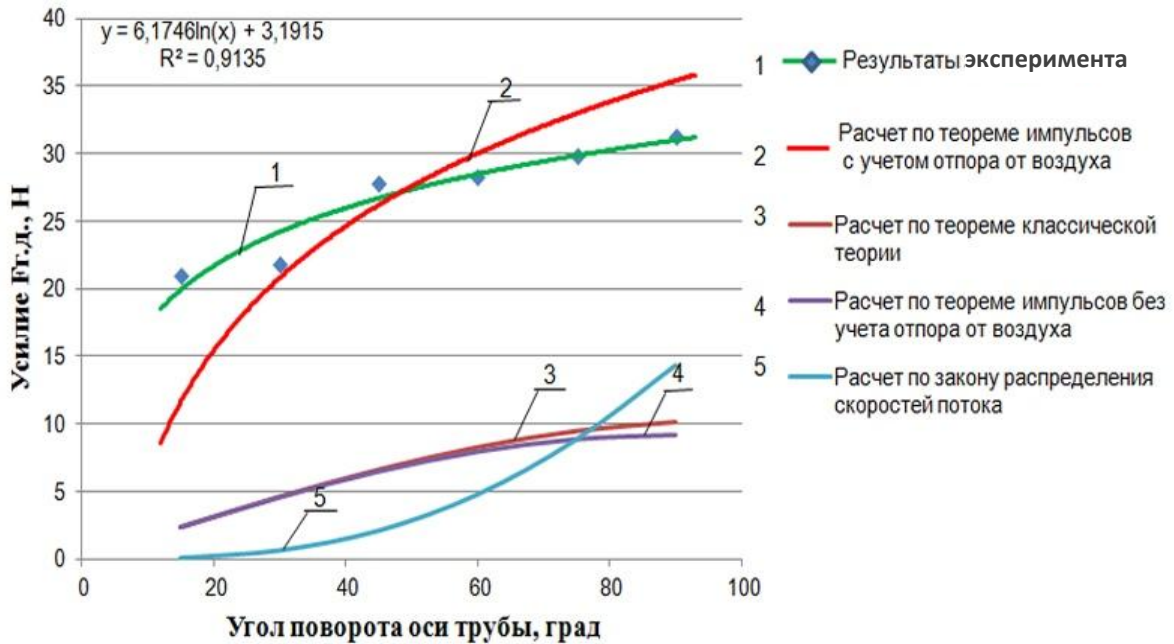


Рисунок 4. Графики изменения вертикальной составляющей силы гидродинамического воздействия потока воды от угла поворота трубы диаметром  $D_{ВН} = 0,025$  м

В результате анализа графиков, представленных на рисунках 2-4, можно сделать вывод, что наименьшую погрешность линии тренда между экспериментальными и расчетными данными имеет график, построенный по результатам расчета по теореме импульсов с учетом отпора от воздуха. Поэтому более точно результат эксперимента описывает график, полученный по расчетам по теореме импульсов с учетом отпора от воздуха.

#### Вывод

В процессе проектирования сложных участков газонефтепроводов необходимо

учитывать силы газодинамического воздействия при проектировании участков с вертикальными поворотами осей магистральных газопроводов, особенно на участках с малыми радиусами поворотов и с большими углами поворотов.

По результатам исследований получен патент [12]. Изобретение позволяет обеспечить стабильность проектного положения от гидродинамического или газодинамического воздействия потока перекачиваемого продукта на подводных переходах.

#### Список литературы

1. Мустафин Ф.М., Абзгильдин Р.Р., Файрузов В.М. Гидродинамическое и газодинамическое воздействие потока перекачиваемого продукта на трубопровод // Трубопроводный транспорт - 2012: матер. VIII Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. Уфа: УГНТУ, 2012. С. 263-264.
2. Кожаева К.В., Шайбаков Б.Р., Мустафин Ф.М. Решение одной из проблем выхода подводного трубопровода из проектного положения на дне подводной траншеи // Трубопроводный транспорт - 2016: матер. XI Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. Уфа: УГНТУ, 2016. С. 256-257.
3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014615082 РФ. Расчет устойчивости трубопровода против гидродинамического воздействия потока перекачиваемой среды / Ф.М. Мустафин, К.В. Куценко, А.Х. Даминова, А.Ю. Машин, Р.Ф. Мустафина, Р.С. Смаков. 2014615082, Заявлено 19.03.2014; Опубл. 20.06.2014.
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014615182 РФ. Расчет устойчивости трубопровода против газодинамического воздействия потока перекачиваемой среды / Ф.М. Мустафин, К.В. Куценко, А.Х. Даминова, А.Ю. Машин, Р.Ф. Мустафина, Р.С. Смаков. 2014615182, Заявлено 02.04.2014; Опубл. 20.06.2014.
5. Мустафин Ф.М., Кусакина М.М., Халиков Р.Р. Влияние гидродинамического и газодинамического воздействия потока перекачиваемого продукта на стенку трубопровода // Матер. 70-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: В 2 т. Уфа: УГНТУ, 2019. С. 367.
6. Кожаева К.В., Якупова Д.Е., Мустафин Ф.М. Методы расчета продольной устойчивости трубопровода и меры по ее обеспечению на участке подводного перехода // Нефтяное хозяйство. 2016. № 2. С. 102-104.

#### References

1. Mustafin F.M., Abzgildin R.R., Fairuzov V.M. Hidrodinamicheskoe i gazodinamicheskoe vozdeistvie potoka perekachivaemogo produkta na truboprovod [Hydrodynamic and Gas-Dynamic Influence of the Pumped Product Flow on the Pipeline]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoi uchebno-nauchno-prakticheskoi konferentsii «Truboprovodnyi transport - 2012»* [Proceedings of the VIII International Training and Research Conference «Pipeline Transport - 2012»]. Ufa, USPTU Publ, 2012, pp. 263-264. [in Russian].
2. Kozhaeva K.V., Shaibakov B.R., Mustafin F.M. Reshenie odnoi iz problem vykhoda podvodnogo truboprovoda iz proektnogo polozheniya na dne podvodnoi transhei [Addressing One of the Issues of Subsea Pipeline Recovery from the Design Position at the Bottom of the Subsea Trench]. *Materialy XI Mezhdunarodnoi uchebno-nauchno-prakticheskoi konferentsii «Truboprovodnyi transport - 2016»* [Proceedings of the XI International Training and Research Conference «Pipeline Transport - 2016»]. Ufa, USPTU Publ, 2016, pp. 256-257. [in Russian].
3. Mustafin F.M., Kutsenko K.V., Daminova A.Kh., Mashin A.Yu., Mustafina R.F., Smakov R.S. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM. Raschet ustoichivosti truboprovoda protiv gidrodinamicheskogo vozdeistviya potoka perekachivaemoi sredy* [Certificate of State Registration of the Computer Program. Calculation of Pipeline Stability against the Hydrodynamic Impact of the Pumped Medium Flow]. Certificate RF, No. 2014615082, 2014. [in Russian].
4. Mustafin F.M., Kutsenko K.V., Daminova A.Kh., Mashin A.Yu., Mustafina R.F., Smakov R.S. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM. Raschet ustoichivosti truboprovoda protiv gazodinamicheskogo vozdeistviya potoka perekachivaemoi sredy* [Certificate of State Registration of the Computer Program. Calculation of Pipeline Stability against the

7. Мустафин Ф.М., Даминова А.Х., Мустафина Р.Ф. Расчет устойчивости трубопровода против гидро-, газодинамического воздействия потока перекачиваемой среды // Матер. 65-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: В 2 т. Уфа: УГНТУ, 2014. С. 135-136.

8. Мустафин Ф.М., Быков Л.И. Технология сооружения газонефтепроводов. Уфа: Нефтегазовое дело, 2007. 632 с.

9. Масков Р.А., Исламова А.Р., Мустафин Ф.М. Напряженно-деформированное состояние подводных переходов магистральных трубопроводов // Матер. 70-й науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых УГНТУ: В 2 т. Уфа: УГНТУ, 2019. С. 368.

10. Мустафин Ф.М., Смаков Р.С., Куценко К.В. Диагностика и расчет устойчивости трубопровода на участке подводного перехода // Трубопроводный транспорт - 2015: матер. X Междунар. учеб.-науч.-практ. конф. Уфа: УГНТУ, 2015. С. 309-312.

Gas-Dynamic Impact of the Pumped Medium Flow]. Certificate RF, No. 2014615182, 2014. [in Russian].

5. Mustafin F.M., Kusakina M.M., Khalikov R.R. Vliyanie gidrodinamicheskogo i gazodinamicheskogo vozdeistviya potoka perekachivaemogo produkta na stenu truboprovoda [Influence of Hydrodynamic and Gas-Dynamic Influence of the Pumped Product Flow on the Pipeline Wall]. *Materialy 70 nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh UGNTU: in 2 t.* [Proceedings of 70 Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists of USPTU: in 2 Books]. Ufa, USPTU Publ, 2019. pp. 367. [in Russian].

6. Kozhaeva K.V., Yakupova D.E., Mustafin F.M. Metody rascheta prodol'noi ustoichivosti truboprovoda i mery po ee obespecheniyu na uchastke podvodnogo perekhoda [Methods for Calculating the Longitudinal Stability of the Pipeline and Security Measures in the Area of Underwater Crossing]. *Neftyanoe khozyaistvo - Oil Industry*, 2016, No. 2, pp. 102-104. [in Russian].

7. Mustafin F.M., Daminova A.Kh., Mustafina R.F. Raschet ustoichivosti truboprovoda protiv gidro-, gazodinamicheskogo vozdeistviya potoka perekachivaemoi sredy [Calculation of Pipeline Stability against Hydro-, Gas-Dynamic Impact of the Pumped Medium Flow]. *Materialy 65 nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh UGNTU: in 2 t.* [Proceedings of 65 Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists of USPTU: in 2 Books]. Ufa, USPTU Publ, 2014. pp. 135-136. [in Russian].

8. Mustafin F.M., Bykov L.I. *Tekhnologiya sooruzheniya gazonefteprovodov* [Technology of Construction of Oil and Gas Pipelines]. Ufa, Neftgazovoe delo Publ., 2007. 632 p. [in Russian].

9. Maskov R.A., Islamova A.R., Mustafin F.M. Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie podvodnykh perekhodov magistral'nykh truboprovodov [Stress-Strain State of Underwater Crossings of Trunk Pipelines]. *Materialy 70-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh UGNTU: v 2 t.* [Proceedings of 70 Scientific and Technical Conference of Students, Graduate Students and Young Scientists of USPTU: in 2 Books]. Ufa, USPTU Publ, 2019, pp. 368. [in Russian].

10. Mustafin F.M., Smakov R.S., Kutsenko K.V. Diagnostika i raschet ustoichivosti truboprovoda na uchastke podvodnogo perekhoda [Diagnosis and Calculation of the Pipeline Stability at the Underwater Crossing]. *Materialy X Mezhdunarodnoi uchebno-nauchno-prakticheskoi konferentsii «Truboprovodnyi transport - 2015»* [Proceedings of the X International Training and Research Conference «Pipeline Transport - 2015»]. Ufa, USPTU Publ, 2015, pp. 309-312. [in Russian].

11. Kozhaeva K.V., Mustafin F.M. Eksperimental'nye issledovaniya po umen'sheniyu prodol'nykh usilii ot temperaturnykh vozdeistvii na podvodnykh uchastkakh truboprovodov [Experimental Studies to Reduce the Longitudinal

Forces from Temperature Effects on Underwater Pipelines]. *Truboprovodnyi transport: teoriya i praktika - Pipeline Transport: Theory and Practice*, 2014, No. 5-6, pp. 59-65. [in Russian].

12. Mustafin F.M., Bakhtizin R.N., Faizullin S.M., Spektor Yu.I., Korolenok A.M., Mashin A.Yu., Gallyamov M.R. *Sposob stabilizatsii proektnogo polozheniya truboprovoda* [How to Stabilise the Design Position of the Pipeline]. Patent RF, No. 2630624, 2017. [in Russian].

### Авторы

• Вэй Бэй

Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Аспирант кафедры «Сооружение и ремонт  
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1  
e-mail: weibei2012@mail.ru

• Мамлиев Эмиль Венирович  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Аспирант кафедры «Сооружение и ремонт  
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1  
e-mail: mamlievemil@mail.ru

• Мустафин Фаниль Мухаметович, доктор  
технических наук, профессор  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Профессор кафедры «Сооружение и ремонт  
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1  
e-mail: st@rusoil.net

• Лобова Елизавета Алексеевна  
Уфимский государственный нефтяной  
технический университет  
Магистрант кафедры «Сооружение и ремонт  
газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа,  
ул. Космонавтов, 1  
e-mail: elisabethlobova@gmail.com

### The Authors

• Wei Bei

Ufa State Petroleum Technological University  
Postgraduate Student of Gas and Oil Pipelines  
and Storage Facilities Construction and Repair  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: weibei2012@mail.ru

• Mamliev Emil V.  
Ufa State Petroleum Technological University  
Postgraduate Student of Gas and Oil Pipelines  
and Storage Facilities Construction and Repair  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: mamlievemil@mail.ru

• Mustafin Fanil M., Doctor of Engineering Sciences,  
Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
Professor of Gas and Oil Pipelines  
and Storage Facilities Construction and Repair  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: st@rusoil.net

• Lobova Elizaveta A.  
Ufa State Petroleum Technological University  
Undergraduate Student of Gas and Oil Pipelines  
and Storage Facilities Construction and Repair  
Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: elisabethlobova@gmail.com