

Научная статья / Original research article

УДК 621.644

DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-3-122-132>

EDN: TNXIIZ



Оценка влияния предварительного напряженного состояния на собственные частоты колебаний надземных трубопроводов

Д. А. Черенцов¹, С. П. Пирогов^{1,2*}

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

²Тюменский государственный университет, Тюмень, Российская Федерация

*pirogovsp@tyuiu.ru

Аннотация. При строительстве промысловых трубопроводов в условиях вечной мерзлоты применяется преимущественно надземная прокладка на опорах. Критически важным параметром при этом является пролет между опорами, который должен рассчитываться с обязательным условием отстройки от резонансных частот, вызванных вихревым возбуждением от ветровой нагрузки. Цель работы — нахождение длины пролета между опорами прокладываемой трубы, причем при оценке ветрового резонанса величина пролета может быть скорректирована. Для решения этой задачи необходимо знать собственные частоты колебаний пролета надземного трубопровода. Для оценки влияния предварительного напряженного состояния трубопровода на его собственные частоты колебаний используется ранее разработанная математическая модель, основанная на уравнении поперечных колебаний стержня с учетом растягивающих усилий. Показано, что наибольшее влияние оказывают нагрузки в продольном направлении, причем рост частот наблюдается при увеличении абсолютного значения нагрузки (независимо от того растягивающие или сжимающие напряжения). Нагрузки в поперечном направлении оказывают незначительное влияние, однако для корректного определения собственных частот их также следует учитывать.

Ключевые слова: надземные трубопроводы, промысловые трубопроводы, предварительное напряженное состояние, собственные частоты, математическое моделирование, численные эксперименты

Благодарности: Авторы выражают благодарность за поддержку данного исследования Министерству науки и высшего образования Российской Федерации, грант номер FEWN-2024-0005.

Для цитирования: Черенцов Д. А., Пирогов С. П. Оценка влияния предварительного напряженного состояния на собственные частоты колебаний надземных трубопроводов. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2026;30(3):122–132. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-3-122-132> EDN: TNXIIZ

Assessment of the influence of the prestress state on the natural frequencies of vibrations of above-ground pipelines

Dmitry A. Cherentsov¹, Sergey P. Pirogov^{1,2*}

¹Tyumen Industrial University, Tyumen, Russian Federation

²Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation

*pirogovsp@tyuiu.ru

Abstract. In field pipeline construction for oil and gas fields located in permafrost conditions, above-ground pipeline installation on supports is predominantly used. A critical parameter in this case is the span between supports, which must be selected to avoid resonance conditions associated with vortex-induced vibrations caused by wind loading. This work aims to determine the span length between supports of pipe laid, and this value may be adjusted based on the assessment of wind-induced resonance. For this aim, the author of this article need to know the natural frequencies of the pipeline spans. To access the influence of the initial stress state of the pipeline on natural frequencies, researchers use a previously developed mathematical model based on the equation of transverse beam vibrations with axial force effects. The study shows that axial loads have the strongest impact: natural frequencies increase with the magnitude of axial force, regardless of whether the stress state is tensile or compressive. Transverse loads have a minor impact, but they should still be included for accurate frequency estimation.

Keywords. above-ground pipelines, field pipelines, pre-stressed state, natural frequencies, mathematical modeling, numerical experiments

Acknowledgments. The authors would like to acknowledge the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, grant number FEWN-2024-0005.

For citation: Cherentsov D. A., Pirogov S. P. Assessment of the influence of the prestress state on the natural frequencies of vibrations of above-ground pipelines. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(3):122–132. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-3-122-132>

Введение

В северных районах наиболее рациональным способом возведения трубопроводов является надземная прокладка.

Цель работы — нахождение длины пролета между опорами прокладываемой трубы, причем при оценке ветрового резонанса величина пролета может быть скорректирована^{1,2}. Для этого необходимо знать собственные частоты колебаний пролета надземного трубопровода. Исследованиям в этой области посвящены труды [1–10].

В работах [11–15] авторами предложена модель для определения собственных частот трубопроводов с учетом перекачиваемой жидкости в однофазном и многофазном состоянии. На основе этой модели произведена оценка предварительного напряженного состояния на собственные частоты колебаний надземных трубопроводов.

¹ ГОСТ 32388–2013. Процессы технологические трубопроводных систем. Нормы и требования проектирования: межгосударственный стандарт: издание официальное: утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 ноября 2013 г. № 1741-ст: дата введ. 2015-01-01 / разработан АО «ВНИИГАЗ». — Москва: Стандартинформ, 2014. — 56 с. — Текст: непосредственный.

² СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85*. Утвержден Федеральным агентством по строительству и жилищно-коммунальному хозяйству 25.12.2012. Введен – 01.07.2013.

Объект и методы исследования

Предложенная математическая модель основана на уравнении поперечных колебаний стержня с учетом растягивающих усилий

$$m(x) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - F \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где w — перемещение трубопровода в поперечном направлении, $m(x)$ — масса единицы сечения трубопровода, E — модуль упругости материала, J — момент инерции сечения, F — растягивающие усилия.

Масса единицы сечения трубопровода определяется как

$$m(x) = \rho_{\text{тр}} S_{\text{тр}} + \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}} + \frac{q(x)}{g}, \quad (2)$$

где $\rho_{\text{тр}}$, $S_{\text{тр}}$ — плотность и площадь сечения трубопровода, $\rho_{\text{ж}}$, $S_{\text{ж}}$ — плотность и площадь сечения перекачиваемого продукта, g — ускорение свободного падения, $q(x)$ — интенсивность нагрузки от внешних воздействий.

Первое слагаемое учитывает массу трубы, второе — массу перекачиваемого продукта, третье — дополнительную нагрузку.

Исследуется стационарный режим, при котором масса жидкости постоянна.

Растягивающее усилие от совокупности нагрузок может быть представлено в виде

$$F = (\mu \sigma_{\text{кц}} - \alpha E \Delta t + E \varepsilon_x) S_{\text{тр}}, \quad (3)$$

где $\sigma_{\text{кц}}$ — кольцевые напряжения, зависящие от внутреннего давления ($Pd/2\delta$), P — внутреннее давление, d — внутренний диаметр трубопровода, δ — толщина стенки трубопровода, μ — коэффициент Пуассона материала, α — коэффициент линейного расширения материала, Δt — возникающий температурный перепад, ε_x — деформация от дополнительных нагрузок.

Учитывая (2) и (3), в (1) получим уравнение, позволяющее учесть предварительное напряженное состояние, при определении частот собственных колебаний

$$\left(\rho_{\text{тр}} S_{\text{тр}} + \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}} + \frac{q(x)}{g} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - \left(\mu \frac{P_x d_{\text{вн}}}{2\delta} - \alpha E \Delta t + E \varepsilon_x \right) S_{\text{тр}} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (4)$$

Здесь P_x — давление вдоль оси трубопровода в зависимости от координаты x . Распределение давления вдоль оси трубопровода зависит от режима течения жидкости и может быть получено как для однофазной, так и для многофазной жидкостей.

Предварительное напряженное состояние может быть вызвано следующим:

- температурное расширение трубопровода, полученное за счет изменения температур монтажа при строительстве и температуры эксплуатации трубопровода — $\alpha E \Delta t$;
- растягивающее/сжимающее усилие в продольном направлении, связанное с перемещением конструкций и аппаратов, к которым подключается трубопровод — $E \varepsilon_x$;
- предварительный изгиб трубопровода, связанный со снеговой или ледовой нагрузкой — $q(x)$.

При оценке предварительного изгиба большой интерес представляет влияние величины прогиба трубопровода, которая также может быть получена при решении стационарного уравнения (1) с учетом заданного значения $q(x)$.

Решение уравнений проводилось методом Бубнова — Галеркина в [11, 13].

Результаты

Исследования проводились на трубопроводе со следующими параметрами: наружный диаметр 114 мм, толщина стенки 7 мм, длина пролета 4,9 м. Трубопровод находился под внутренним избыточным давлением равным нулю, транспортируемая жидкость — вода.

Как показано на рисунке 1, изменение температуры значительно влияет на собственную частоту колебаний. Нагрев, вызывающий сжимающие усилия, и охлаждение, приводящее к растягивающим усилиям, изменяют жесткость конструкции, что отражается на ее динамических характеристиках.

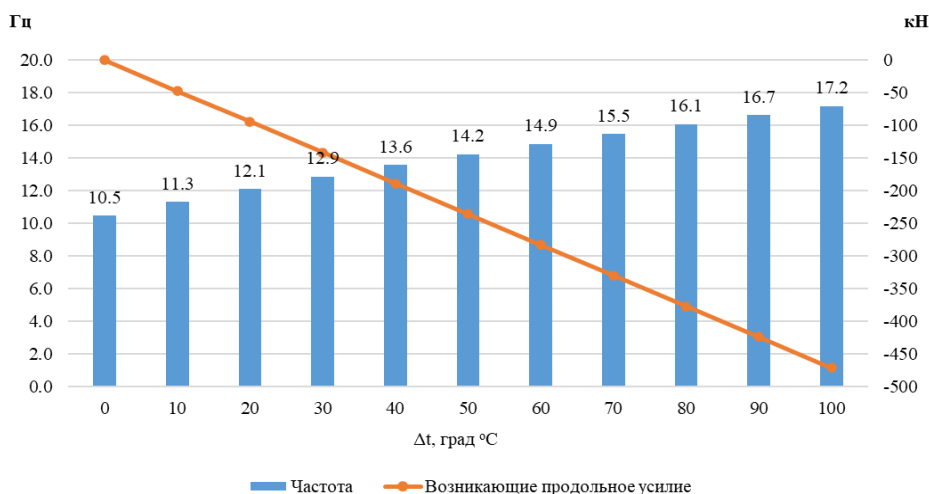


Рис. 1. Изменение собственных частот при увеличении Δt
Fig. 1. Changing natural frequencies with increasing Δt

С ростом перепада температуры наблюдается значительный рост сжимающих продольных усилий в трубопроводе и значительный рост собственных частот — почти в 2 раза.

Оценка влияния на собственные частоты растягивающих и сжимающих усилий в продольном направлении, вызванных возможным перемещением конструкций и аппаратов, к которым они примыкают, представлена на рисунке 2.

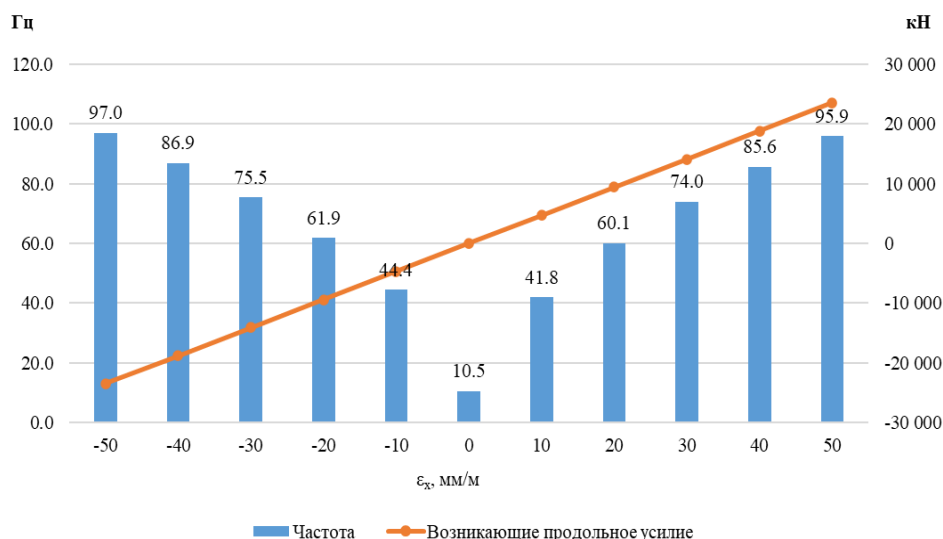


Рис. 2. Изменение частоты собственных колебаний при изменении относительной продольной деформации

Fig. 2. Change in natural frequency of oscillation with change in relative longitudinal strain

Результаты оценки частот при изменении относительной продольной деформации показали, что при увеличении продольного усилия собственные частоты увеличиваются. При этом неважно, какие усилия возникают — растягивающие или сжимающие.

Предварительный изгиб трубопровода, связанный со снеговой или ледовой нагрузкой, характеризуется дополнительной распределенной нагрузкой — $q(x)$.

Прогиб трубы наблюдается и при отсутствии дополнительной нагрузки, это связано с учетом дополнительной массы от перекачиваемой продукции. Изменение прогибов вдоль оси трубопроводов при изменении дополнительной нагрузки представлено на рисунке 3.

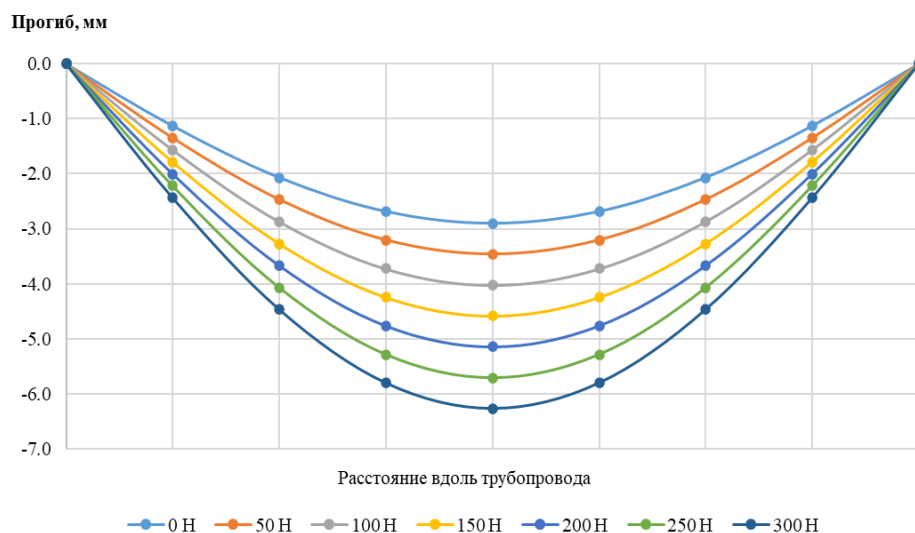


Рис. 3. Изменение прогибов при изменении дополнительной нагрузки
Fig. 3. Changes of deflection under changes in additional loading

Изменение собственных частот колебаний при изменении дополнительной нагрузки показано в таблице 1.

Таблица 1. Изменение собственных частот
Table 1. Changing natural frequencies

Дополнительная нагрузка, Н/м	Прогиб в середине трубопровода, мм	Частота, Гц
0	2,9	10,5
50	3,5	9,6
100	4,0	8,9
150	4,6	8,3
200	5,1	7,9
250	5,7	7,5
300	6,3	7,1

Снижение собственных частот обусловлено увеличением общей массы трубопровода. Изменение массы от снеговой или ледовой нагрузки на 5 кг/м, что меняет дополнительную нагрузку на 50 Н, приводит к изменению частоты на 8–10 %.

Также интерес представляет изменение собственной частоты при совместном воздействии нагрузок в продольном и поперечном направлениях. Результаты изменения прогибов продемонстрированы на рисунке 4, а изменения частот — на рисунке 5.

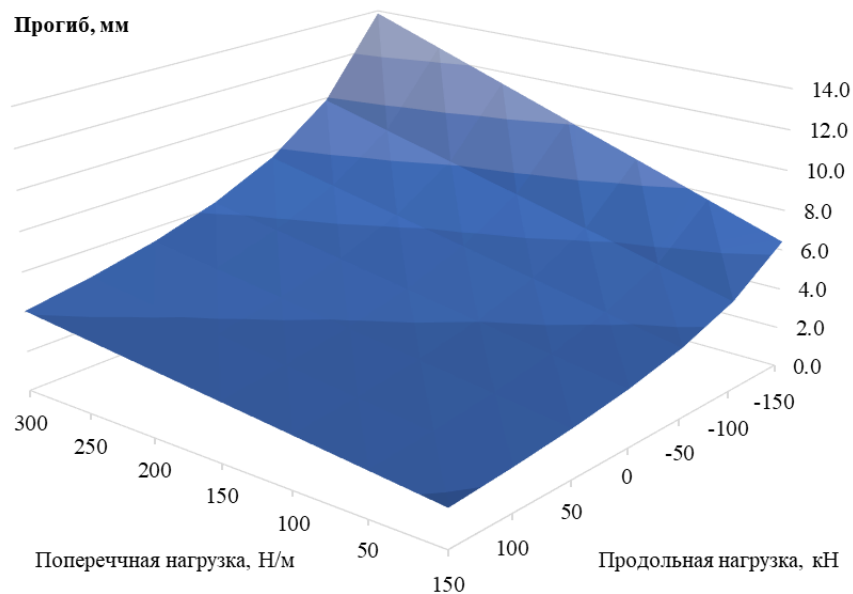


Рис. 4. Изменение прогиба при совместном воздействии продольных и поперечных нагрузок
Fig. 4. Change in deflection under combined longitudinal and transverse loads

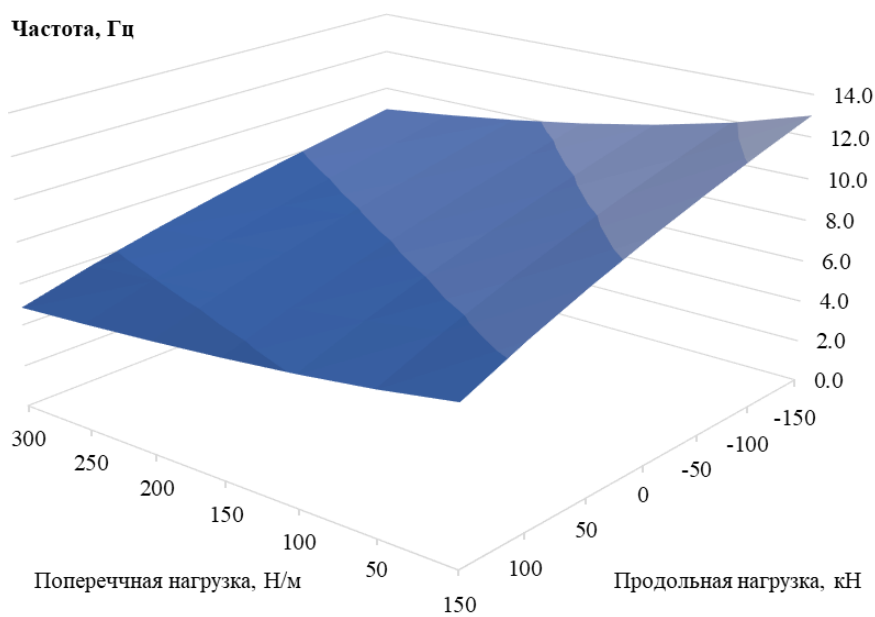


Рис. 5. Изменение собственных частот при совместном воздействии продольных и поперечных нагрузок
Fig. 5. Change in natural frequencies under combined longitudinal and transverse loads

Обсуждение

Проведенное исследование позволило количественно оценить влияние различных факторов предварительного напряженного состояния на собственные частоты колебаний пролетов надземных трубопроводов.

Наиболее существенным результатом является выраженное снижение собственных частот при увеличении поперечной нагрузки, моделирующей снеговое или ледовое обледенение. Это связано с увеличением общей массы системы, что служит доминирующим фактором в данном случае. Увеличение статического прогиба, сопровождающее это явление, дополнительно меняет жесткость, что также вносит вклад в изменение динамических характеристик.

Продольные усилия — как растягивающие, так и сжимающие — продемонстрировали тенденцию к увеличению собственных частот. Неочевидный результат для сжимающих усилий свидетельствует о том, что в исследуемом диапазоне доминирующую роль играет не потеря устойчивости, а увеличение обобщенной жесткости конструкции. Эффект от температурных деформаций и продольных смещений опор оказался сопоставимым по значимости, а в случае значительных перепадов температуры приводил к почти двукратному росту частот. Это подтверждает, что даже без изменения геометрии и массы, вариации внутреннего напряженного состояния существенно влияют на собственные частоты колебаний.

Совместное воздействие продольных и поперечных нагрузок создает сложное напряженное состояние, при котором их эффекты накладываются друг на друга. Так, увеличение снеговой нагрузки, стремящееся снизить частоту, может быть частично или полностью скомпенсировано возникающими при охлаждении растягивающими усилиями. Следовательно, прогнозирование реального поведения трубопровода в условиях эксплуатации невозможно без комплексного учета всей совокупности воздействий, как это реализовано в предложенной модели.

Выводы

Произведена оценка влияния предварительного напряженного состояния трубопроводов на собственные частоты колебаний. Результаты показали следующее:

1. С ростом перепада температуры наблюдается значительный рост сжимающих продольных усилий в трубопроводе и значительный рост собственных частот. Для рассматриваемого участка наблюдается увеличение частоты почти в 2 раза (с 10,5 до 17,2 Гц).
2. При изменении относительной продольной деформации (при увеличении продольного усилия) собственные частоты увеличиваются. При этом неважно, какие усилия возникают — растягивающие или сжимающие.

3. Совместное воздействие нагрузок в продольном и поперечных направлениях оказывают существенное влияние на собственные частоты, для корректного определения которых следует учитывать их комплексное влияние. Для рассматриваемого участка наблюдается увеличение частоты с 10,5 до 13,0 Гц.

Вклад авторов

Все авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Authors' contributions

All authors contributed equally to the preparation of the manuscript.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The authors declare no conflicts of interest.

Список источников

1. Феодосьев В. И. О колебаниях и устойчивости трубы при протекании через нее жидкости. *Инженерный сборник*. 1952;(10);169–170.
2. Ефимов А. А. Свободные колебания подводных нефтепроводов. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2008;(1):49–56.
3. Ильин В. П. Исследование свободных колебаний кривой трубы с потоком жидкости. *Успехи строительной механики и теории сооружений. В сб.: научных трудов Саратовского государственного технического университета и Российской академии архитектуры и строительных наук*. Саратов : СГТУ; 2010. С. 88–93.
4. Соколов В. Г., Березнев А. В. Уравнения движения криволинейного участка трубопровода с потоком жидкости. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2004;(6):76–80.
5. Соколов В. Г., Березнев А. В. Решение задачи о свободных колебаниях криволинейных участков трубопроводов с протекающей жидкостью. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2005;(1):80–84.
6. Зарипов Д. М. Нелинейные колебания трубопровода под действием внутреннего ударного давления жидкости. *Труды Института механики Уфимского научного центра РАН*. 2016;(11):136–140.
7. Миронов М. А., Пятаков П. А., Андреев А. А. Вынужденные колебания трубы с потоком жидкости. *Акустический журнал*. 2010;56(5): 684–692.
8. Шакирьянов М. М. Пространственные хаотические колебания трубопровода в сплошной среде под действием переменного внутреннего давления. *Известия Уфимского научного центра РАН*. 2016;(4):35–47.
9. Ганиев Р. Ф., Ильгамов М. А., Хакимов А. Г., Шакирьянов М. М. Пространственные непериодические колебания трубопровода под действием переменного внутреннего давления. *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2017;(2):3–12.

10. Черенцов Д. А., Пирогов С. П., Дорофеев С. М. Математическая модель манометрической пружины в вязкой среде. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2014;(7):234–241.
11. Черенцов Д. А., Пирогов С. П. Определение частот свободных колебаний надземных участков трубопроводов, транспортирующих несжимаемую жидкость. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2023;(3): 84–94. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2023-3-84-94>
12. Черенцов Д. А., Пирогов С. П. Влияние перекачиваемой жидкости на частоты свободных колебаний надземных участков трубопроводов. *Деловой журнал Neftegaz.RU*. 2023;8(140):118–119.
13. Черенцов Д. А., Пирогов С. П. Математическая модель свободных колебаний надземных участков трубопроводов, транспортирующих многофазную жидкость. *Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика*. 2024;10(4-40):68–78. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-68-78>
14. Черенцов Д. А., Пирогов С. П. Оценка влияния параметров многофазной жидкости на собственные частоты колебаний надземных промысловых трубопроводов. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2025;1(169): 100–112. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2025-1-100-112>
15. Черенцов Д. А., Пирогов С. П., Голосов С. М., Новоселова О. С. Исследование форм и частот свободных колебаний участков надземных трубопроводов. *Деловой журнал Neftegaz.RU*. 2025;11(168):44–119.

References

1. Feodos'ev V. I. (1951). About the oscillations and stability of a pipe when liquid flows through it. *Inzhenernyy sbornik*. 1952;(10);169–170. (In Russ.).
2. Efimov A. A. (2008). Free fluctuations of underwater oil pipelines. *Oil and Gas Studies*. 2008;(1): 49–56. (In Russ.).
3. Ilyin V. P. Research of Free Oscillations of a Curved Pipe with a Fluid Flow. *Advances in Structural Mechanics and Theory of Constructions. In the Collection of Scientific Papers of the Saratov State Technical University and the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences*. Saratov: SSTU; 2010. P. 88–93. (In Russ.).
4. Sokolov V. G., Bereznev A. V. Equations of motion for a curved section of a pipeline with a flowing liquid. *Oil and Gas Studies*. 2004;(6):76–80. (In Russ.).
5. Sokolov V. G., Bereznev A. V. Solution of the problem of free oscillations of curved sections of pipelines with flowing liquid. *Oil and Gas Studies*. 2005;(1): 80–84. (In Russ.).
6. Zaripov D. M. Nonlinear oscillations of the pipeline caused by internal fluid pressure. *Trudy Instituta mekhaniki Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*. 2016;(11):136–140. (In Russ.).
7. Mironov M. A., Pyatakov P. A., Andreev A. A. Forced flexural vibrations of a pipe with a liquid flow. *Acoustical Physics*. 2010;56(5): 684–692.
8. Shakiryanov M. M. Spatial chaotic vibrations of a pipeline in the continuous medium under the impact of alternating internal pressure. *Izvestiya Ufimskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2016;(4):35–47. (In Russ.).
9. Ganiev R. F., Il'gamov M. A., Khakimov A. G., Shakiryanov M. M. (2017). Spatial aperiodic vibrations of the pipelines under transient internal pressure. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2017;(2):3–12. (In Russ.).

10. Cherentsov D. A., Pirogov S. P., Dorofeyev S. M. Mathematical model of manometric spring in a viscous medium. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*. 2014;(7):234–241. (In Russ.).
11. Cherentsov D. A., Pirogov S. P. Determination of the natural frequencies of the above-ground sections of pipelines transporting an incompressible fluid. *Oil and Gas Studies*. 2023;(3):84–94. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2023-3-84-94>
12. Cherentsov D. A., Pirogov S. P. The effect of the pumped liquid on the free oscillation frequencies of above-ground pipeline sections. *Neftegaz.RU Business Journal*. 2023;8(140):118–119. (In Russ.).
13. Cherentsov, D. A., Pirogov, S. P. Mathematical model of free vibrations in above-ground pipelines sections transporting multiphase fluid. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 2024;10(4-40):68–78. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-68-78>
14. Cherentsov D. A., Pirogov S. P. Evaluation of the influence of multiphase fluid parameters on the natural frequencies of above-ground field pipelines. *Oil and Gas Studies*. 2025;(1):100–112. (In Russ.). <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2025-1-100-112>
15. Cherentsov D. A., Pirogov S. P., Golosov S. M., Novoselova O. S. Investigation of the shapes and frequencies of free oscillations of above-ground pipeline sections. *Neftegaz.RU Business Journal*. 2025;11(168):44–119. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Черенцов Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

Пирогов Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, pirogovsp@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5171-8942>

Dmitry A. Cherentsov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen

Sergey P. Pirogov, Doctor of Engineering Sciences, Professor at the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, pirogovsp@tyuiu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5171-8942>

Поступила в редакцию / Received 05.11.2025

Поступила после рецензирования / Revised 19.11.2025

Принята к публикации / Accepted 25.11.2025