

Научная статья / Original research article

УДК 69.058

DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-166-179>

EDN: MSBONW



Концепция гибридной методики геотехнического мониторинга в криолитозоне

**П. В. Чепур^{1*}, М. В. Андреев¹, А. А. Туганова¹, М. А. Колпаков¹,
Н. А. Лазарев²**

¹Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация

²Технологический институт НИЯУ МИФИ, Лесной, Российская Федерация

*chepur_p_v@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке концепции гибридной методики геотехнического мониторинга зданий и сооружений, эксплуатируемых в условиях криолитозоны. Предложенная концепция объединяет натурные измерения с применением широкого комплекса оборудования и численное моделирование в рамках единой информационной системы. Описан принцип аккумулирования данных измерений, полученных из разных источников с применением различных методов и соответствующего оборудования. Предложен принцип классифицирования по типам, с аккумулированием в единой базе-интерпретаторе. Полученная база данных служит основой для построения цифровых двойников объекта с применением математических моделей. Объединение процессов мониторинга с обработкой результатов в численных программных комплексах позволяет повысить точность оценки напряженно-деформированного состояния конструкций и более корректно оценить достаточность массива данных. Результатом работы является концепция, при успешной технической реализации которой станет возможным выявление критических зон, отклонений от нормативных значений и формирование рекомендаций по обеспечению эксплуатационной безопасности исследуемых объектов.

Ключевые слова: геотехнический мониторинг, криолитозона, многолетнемерзлые грунты, гибридная методика

Для цитирования: П. В. Чепур, М. В. Андреев, А. А. Туганова, М. А. Колпаков, Н. А. Лазарев. Концепция гибридной методики геотехнического мониторинга в криолитозоне. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2026;30(4):166–179. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-166-179> EDN: MSBONW

Concept of hybrid technique of geotechnical monitoring in the cryolithozone

**Petr V. Chepur^{1*}, Maksim V. Andreenkov¹, Arina A. Tuganova¹,
Matvey A. Kolpakov¹, Nikita A. Lazarev²**

¹Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

²Institute of Technology NIAU MIFI, Lesnoy, Tyumen, Russian Federation

*chepur_p_v@mail.ru

Abstract. This article deals with the development of a hybrid methodology for geotechnical monitoring of buildings and structures operating in permafrost zone. This approach combines in-situ measurements using a wide range of equipment and numerical modeling within a single information system. This work describes a principle for accumulating measurement data obtained from various sources using various methods and appropriate equipment. The authors of this article classify the data by type, with accumulation in a unified interpreter database. This database serves as a foundation for developing digital twins of monitored facilities using mathematical models. Combining monitoring processes with the processing of measurement results in numerical software packages enhances the accuracy in assessing the stress-strain state of structures and facilitates a more reliable evaluation of data sufficiency. The result of this work is a concept, the successful technical implementation of which will enable identifying critical zones, detecting deviations from design and regulatory requirements, and generating recommendations for ensuring the operational safety of the monitored facilities.

Keywords: *geotechnical monitoring, cryolithozone, permafrost soils, hybrid technique*

For citation: Chepur P. V., Andreenkov M. V., Tuganova A. A., Kolpakov M. A., Lazarev N. A. Concept of hybrid technique of geotechnical monitoring in the cryolithozone. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(4):166–179. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-4-166-179>

Введение

Современные инженерные системы, функционирующие в районах распространения многолетнемерзлых грунтов (ММГ), сталкиваются с проблемой деградации криолитозоны вследствие изменения теплового баланса и антропогенных нагрузок. В первую очередь, процессы деградации ММГ вызваны глобальными климатическими факторами. По оценкам [1], рост среднегодовой температуры в интервале широт 65–73° СШ территориальной зоны ЯНАО за 30 лет вырос на 2,5 °С. Согласно [2] повышение температурного режима ММГ может приводить как к незначительным деформациям оснований сооружений, так и к серьезным последствиям с критическими перемещениями конструкций и фундаментов эксплуатируемой на соответствующих территориях инфраструктуры [3, 4].

Для своевременного выявления деформаций, осадок оснований и фундаментов сооружений, а также при развитии криогенных процессов требуется непрерывный и высокоточный мониторинг. Отсутствие документальной фиксации изменений пространственного положения конструкций зачастую приводит к деградации сооружений и впоследствии — к возможным авариям [5]. Традиционные геотехнические методы, основанные на стационарных наблюдениях, не обеспечивают достаточного пространственного охвата, тогда как дистанционные технологии дают широкий обзор, но требуют уточнения локальных параметров [6].

Существуют предложения и научные гипотезы о необходимости применения комплексного подхода к сбору, хранению, обработке и анализу данных геотехнического мониторинга в рамках единой системы [7–9]. В настоящей работе предлагается концепция гибридной методики мониторинга сооружений и конструкций на ММГ, обеспечивающая многомасштаб-

ную систему анализа в соответствии с технологическими запросами заказчиков, эксплуатирующих объекты нефтегазовой инфраструктуры [10].

Объект, методы исследования и результаты

Объект исследования — гибридная система геотехнического мониторинга конструкций и геологического массива в условиях многолетнемерзлых грунтов, эксплуатируемых в условиях воздействия природных и техногенных факторов. Система, общий алгоритм которой представлен на рисунке 1, включает оценку напряженно-деформированного состояния стенки, дна и крыши резервуара, характеристик основания, снеговой и температурной нагрузки, а также факторов микросейсмической активности [11–15].



Рис. 1. Общий алгоритм по блокам
Fig. 1. General algorithm for blocks

К средствам контроля относятся измерительные комплексы, обеспечивающие регистрацию параметров реального состояния конструкции: тензометры, инклинометры, экстензометры, ячейки давления, геодезические приборы, влагомеры, тепловизионное оборудование и датчики температуры. Для хранения полученных данных, имеющих различное представление (тип данных) и соответствующие форматы, предлагается разработка единой базы-интерпретатора (БИ). Назначением такой БИ является первичная загрузка, классификация, хранение, обработка, анализ и последующий экспорт соответствующих данных для моделирования и импорта результатов моделирования.

К неразрушающему контролю относятся такие используемые методы исследования общего геологического массива, а также зданий и сооружений (ЗиС), как: измерение напряжений и деформаций; геофизические методы; геодезические методы; температурно-влажностные измерения; снегомерные наблюдения.

Для определения напряженно-деформируемого состояния (НДС) применяются следующие методы:

- тензометрия, основанная на преобразовании механической деформации в изменение электрического сопротивления. Этот принцип реализуется через тензорезистор (датчик деформации);
- инклинометрия, позволяющая регистрировать ускорения вдоль осей X и Y и вычислять смещение от вертикали;
- экстензометрия, обеспечивающая измерение линейных перемещений и деформаций;

- измерение давления, выполняемое с помощью вибро- и тензочеек, выходной сигнал которых пропорционален давлению;
- электротомография сопротивлений — измерение напряжений и токов с вычислением кажущегося сопротивления.
- При оценке состояния основания и выявления структурных неоднородностей грунтового массива используется микросейсмический мониторинг — регистрация виброскорости и ускорений по трем осям с высокой частотой дискретизации.

Для формирования итоговой пространственной модели местности применяется набор методов геодезических измерений:

- нивелирование — определение превышений и отметок точек;
- измерения теодолитом — определение горизонтальных и вертикальных углов;
- тахеометрическая съемка — получение 3D-координат контрольных точек;
- лазерное 3D-сканирование — получение облаков точек высокой плотности;
- георадарные исследования — получение двумерных разрезов амплитуд, оценка структуры основания.

К температурно-влажностному контролю относятся:

- измерения температуры — регистрация параметров электрического сопротивления/напряжения (преобразуемых в температуру) с использованием термометрических кабелей и датчиков;
- влагомерная съемка — измерения диэлектрической проницаемости грунтов, определение влажности грунтов;
- тепловизионная съемка — формирование радиометрических полей температур.

Определение высоты снежного покрова, а также его плотности и мощности происходит по следующим принципам:

- измерение высоты снежного покрова, осуществляемое с помощью снегомерной рейки, на которую нанесена шкала, визуально считываемая специалистом в процессе измерения;
- определение мощности покрова, выполняемое с использованием ультразвукового снегомера; способ измерения состоит в регистрации времени прохождения импульса через однородный массив снежной массы и последующем вычислении толщины слоя.

Получение исходной информации для осуществления анализа параметров геотехнического мониторинга характеризуется большой номенклатурой оборудования с соответствующим методом сбора данных (рис. 2, 3). Каждая единица оборудования имеет собственный формат выходных данных (по результатам измерений), что необходимо учитывать при последующей цифровой обработке. Получаемая в ходе измерений информация классифицируется по собственным типам данных: Scalar (одиночные значения), Vector-2D (двумерные векторы), Vector-3D (трехмерные векторы), Time Series (временные ряды), Matrix (матричные данные), Point Cloud (облако точек). Каждому выходному параметру присваивается временная отметка проведения измерений, а также пространственные координатные отметки. Полученная информация приводится к единому формату хранения.



Рис. 2. Блоки сбора данных (левая ветка)
Fig. 2. Data collection units (left part)



Рис. 3. Блоки сбора данных (правая ветка)
Fig. 3. Data collection units (right part)

Следующий этап — проведение детального анализа данных, аккумулярованных в единой базе-интерпретаторе, с требованиями к действующей

нормативной документации (рис. 4). Цель этого анализа — определение соответствия измеряемых параметров установленным пределам, критическим значениям и проектным допускам, регламентированным для конкретного типа конструкций и условий региона строительства.

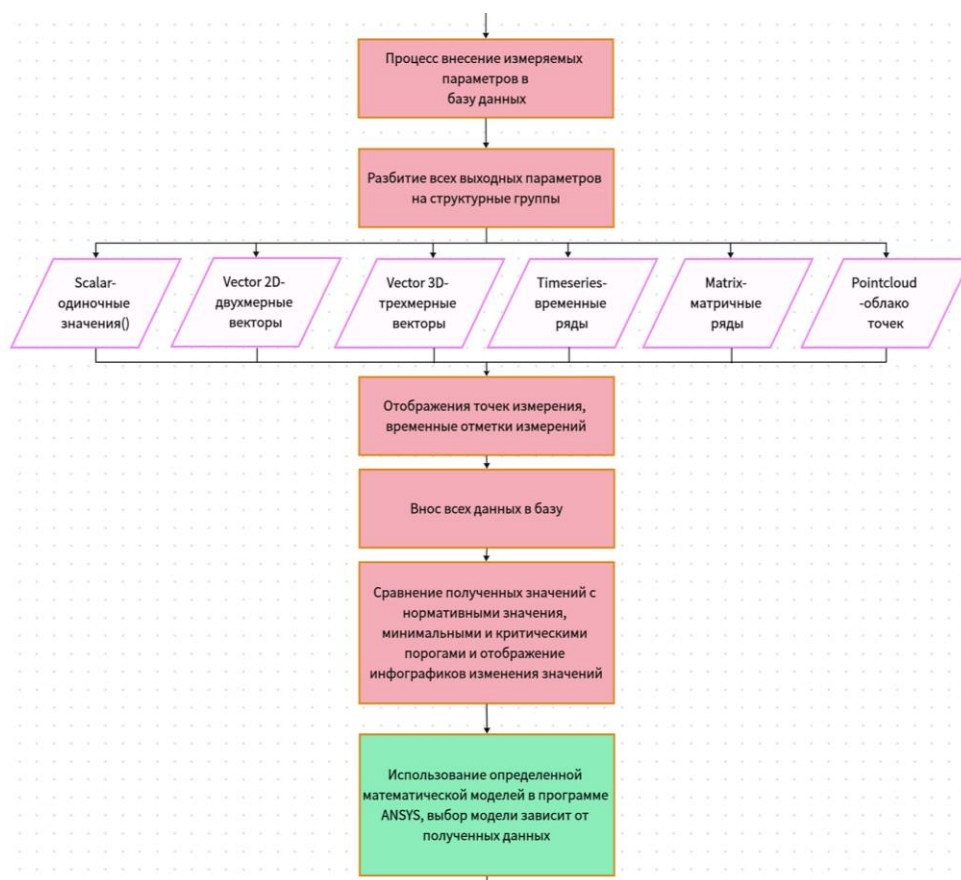


Рис. 4. Блок формирования базы данных
Fig. 4. Database generation block

Один из ключевых этапов гибридной методики ГТМ — блок численного моделирования [16–19], позволяющий интерпретировать натуральные данные в контексте пространственных и силовых воздействий на конструкцию и общий геологический массив (рис. 5, 6).



Рис. 5. Блок численного моделирования (левая ветка)
Fig. 5. Numerical modeling block (left part)



Рис. 6. Блок численного моделирования (левая ветка)

Fig. 6. Numerical modeling block (right part)

На основе выходных данных формируется массив параметров, необходимый для построения расчетных схем и последующего построения цифровых двойников объекта с использованием следующих математических моделей (табл. 1): модели потери устойчивости (классическая постановка, уравнение для пластин и оболочек); модели механики сплошной среды (уравнения неразрывности, уравнения движения, уравнения сохранения энергии); оболочечная теория (кинематические соотношения, уравнения равновесия); уравнения термоупругости (кинематическое соотношение, уравнения равновесия, физические уравнения, уравнения теплопроводности); уравнения, учитывающие геометрические нелинейности (кинематическое соотношение, уравнения равновесия, физические уравнения); уравнения для описания контактного взаимодействия элементов модели (основание — фундамент — металлоконструкция — жидкость).

Таблица 1. Используемые аналитические и численные модели

Table 1. Analytical and numerical models

Модели потери устойчивости	
Критическая нагрузка Эйлера (стержня): $P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2}$	(1)
Уравнение потери устойчивости пластины: $D \nabla^4 w = N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}$	(2)
Уравнение потери устойчивости цилиндрической оболочки: $D \nabla^4 w + \frac{Eh \partial^4 w}{R^2 \partial x^4} = -N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - \frac{N_\varphi \partial^2 w}{R^2 \partial \varphi^2}$	(3)
Механика сплошной среды	
Уравнения неразрывности (дифференциальная форма): $\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla * (pv) = 0$	(4)
Уравнение движения (тензорная форма): $p \frac{Dv_i}{Dt} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + pf_i$	(5)
Уравнение сохранения энергии (Первое начало термодинамики): $p \dot{e} = \sigma_{ij} d_{ij} - \nabla_j q_j + pr$	(6)

Оболочечная теория	
Деформация срединной поверхности: $\varepsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(\cup_{\alpha;\beta} + \cup_{\beta;\alpha}) - b_{\alpha\beta}w$	(7)
Уравнения равновесия оболочки: $N_{\alpha}^{\alpha\beta} + b_{\alpha}^{\beta}Q^{\alpha} + p^{\beta} = 0$	(8)
Уравнения термоупругости	
Тензор деформации Коши: $\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)$	(9)
Уравнения равновесия: $\sigma_{ij,j} + pf_i = 0$	(10)
Закон Дюамеля — Неймана: $\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \alpha\Delta T\delta_{ij}$	(11)
Уравнение теплопроводности: $pc_E\dot{T} = \nabla(k\nabla T) + (3\lambda + 2\mu)\alpha T_0\varepsilon_{kk} + Q$	(12)
Уравнения с геометрической нелинейностью	
Тензор Грина — Лангранжа: $E_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i}\frac{\partial u_k}{\partial x_j}\right)$	(13)
Уравнения равновесия: $\int_{V_0} S_{ij}\partial E_{ij}dV_0 = \int_{V_0} p_0f_i\partial u_idV_0 + \int_{\partial V_0} t_i\partial u_idA_0$	(14)
Уравнения Сен-Венана-Кирхгофа: $W = \frac{\lambda}{2}(trE)^2 + \mu trE^2$	(15)
Контактное взаимодействие: основание — фундамент — конструкция — жидкость	
Модель Винклера: $p_n = k_w w \quad k_w = \frac{E_s}{(1 - \nu_s^2)BI}$	(16)
Условия Герца — Синьорини: $[u_n] \geq 0, \quad \sigma_n \leq 0, \quad \sigma_n[u_n] = 0$	(17)
Уравнение Навье — Стокса: $p_f \frac{\partial v}{\partial v} + p_f(v\nabla)v = -\nabla p + \mu\nabla^2 v + p_f g$	(18)

* P_{cr} — критическая сжимающая сила; E — модуль упругости материала; I — момент инерции поперечного сечения стержня; μ — коэффициент приведенной длины; l — длина стержня; D — цилиндрическая жесткость пластины; ∇ — бигармонический оператор; N_x, N_y — мембранные усилия; w — прогиб пластины или оси стержня; N_{xy} — мембранное касательное усилие; R — радиус срединной поверхности цилиндрической оболочки; φ — угловая координата цилиндрической оболочки; N_{φ} — окружное мембранное усилие в цилиндрической оболочке; ν — коэффициент Пуассона; p — плотность среды; t — время; σ_{ij} — тензор истинных напряжений; x, y — пространственные координаты; f_i — компонента вектора объемных сил; e — удельная внутренняя энергия; q_j — вектор теплового потока; d_{ij} — тензор скоростей деформации; $\varepsilon_{\alpha\beta}$ — компонента тензора деформаций; $\cup_{\alpha;\beta}$ — ковариантная производная по

поверхности; $b_{\alpha\beta}$ — тензор кривизны; $N^{\alpha\beta}$ — тензор мембранных усилий; Q^{α} — поперечные усилия; p^{β} — поверхностная нагрузка; ε_{ij} — тензор малых деформаций Коши; u_i — компонента вектора перемещений; σ_{kk} — инвариант тензора напряжений; δ_{ij} — символ Кронекера; α — коэффициент линейного термического расширения; ΔT — отклонение температуры от отсчетного значения; T_0 — отсчетная абсолютная температура; ε_{kk} — скорость объемного расширения; c_E — удельная теплоемкость при постоянных деформациях; E_{ij} — компонент тензора деформаций Грина-Лангранжа; S_{ij} — тензор напряжений Пиолы — Кирхгофа; V_0 — объем области в отсчетной конфигурации; p_n — нормальное контактное давление; k_w — коэффициент постели Винклера; E_s — модуль упругости грунтового основания; B — ширина контактной площади фундамента; σ_n — нормальное контактное напряжение; $[u_n]$ — разрыв нормального перемещения; g — вектор ускорения свободного падения

На основании интегрированных данных от измерительных комплексов и результатов численного моделирования формируется геоинформационная модель (ГИС-модель). Она представляет собой многослойную цифровую среду, аккумулирующую пространственно-распределенные параметры состояния объекта. ГИС-модель включает в себя пространственные слои: геодезические отметки и смещения; облака точек сканирования; распределения температур, влажности, напряжений, микросейсмических событий; критические зоны по результатам численного анализа. ГИС-страты обеспечивают комплексную визуализацию объектов контроля и позволяют проводить пространственный анализ.

На основе выполненных аналитических и расчетных этапов происходит подготовка инженерного отчета (рис. 7). Его задача заключается в консолидации всех полученных данных, где описываются: обобщенные результаты мониторинга; отклонения измеряемых параметров от нормативных значений; интерпретация результатов численного моделирования; визуализация критических порогов; рекомендации по обеспечению устойчивости и эксплуатационной безопасности исследуемого объекта.

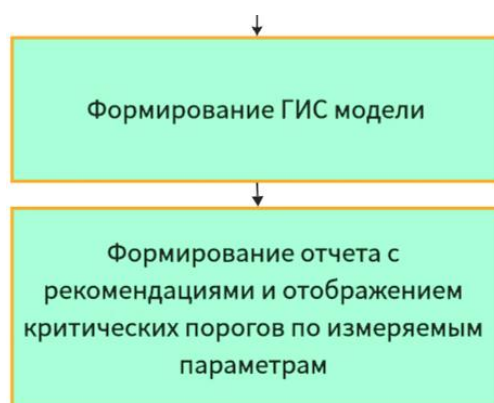


Рис. 7. Блок формирования итогового отчета

Fig. 7. Final report generation block

Обсуждение и выводы

По результатам выполненной работы подтверждается актуальность и практическая значимость применения гибридной методики геотехнического мониторинга, основанной на сочетании натуральных измерений и численного моделирования, с использованием широкого спектра оборудования. Одно из существенных отличий предлагаемого подхода в том, что данные мониторинга не рассматриваются изолированно, а интегрируются в единую базу данных и используются для построения численных моделей. При использовании такого подхода обеспечивается возможность сравнения фактических параметров с нормативными и критическими значениями.

Полученные результаты исследования демонстрируют, что совместное использование методов геотехнического мониторинга в связке с численным моделированием обеспечивает более высокую достоверность технического состояния конструкции и окружающего геологического массива по сравнению с использованием только методов геотехнического мониторинга, основанных лишь на геодезических или на расчетных данных.

Вклад авторов

Чепур П. В.: научное редактирование текста; ответы на замечания.

Андреенков М. В.: написание статьи; научное редактирование текста; ответы на замечания.

Туганова А. А.: научное редактирование текста; ответы на замечания.

Колпаков М. А.: научное редактирование текста; ответы на замечания.

Лазарев Н. А.: научное редактирование текста; работа с базой данных.

Authors' contribution

Petr V. Chepur: scientific editing; responses to comments.

Maksim V. Andreenkov: writing; scientific editing; responses to comments.

Arina A. Tuganova: scientific editing; responses to comments.

Kolpakov Matvey A.: scientific editing; responses to comments.

Nikita A. Lazarev: scientific editing; work with the database.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Список источников

1. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А. *Исследование закономерностей развития неравномерных осадок резервуаров численными методами*. Новосибирск: Наука; 2017. 172 с.

2. Андреенков М. В. Туганова А. А., Колпаков М. А. Концепция гибридной методики геотехнического мониторинга сооружений криолитозоны. В сб.: *Энергосбережение и инновационные технологии в топливно-энергетическом комплексе: материалы Национальной научно-практической конференции (18–19 декабря 2025 года)*. Тюмень: ТИУ; 2025. С. 111–114.

3. Горбань Н. Н., Васильев Г. Г., Леонович И. А. Задачи формирования параметрической системы обеспечения комплексной безопасности резервуарных парков морских терминалов. *Нефтяное хозяйство*. 2024;(1):90–97. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-1-90-97>

4. Гарькин И. Н., Гарькина И. А. *Техническая экспертиза зданий и сооружений*. Москва: Перо; 2021. 128 с.
5. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А. Оценка технического состояния резервуаров с недопустимыми геометрическими несовершенствами формы стенки. *Нефтяное хозяйство*. 2017;(6):118–121. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-118-121>
6. Вознесенский Е. А. Распространение и прогноз развития опасных геологических процессов на территории России. *Вестник Российской академии наук*. 2024; (94-8):749–759. <https://doi.org/10.31857/S0869587324080061>
7. Коновалов В. Б., Кашеев Р. Л., Саркисов С. В., Рузибаев И. А., Кижжаев П. В., Добрышкин Е. О. [и др.]. *Устройство для оценки технического состояния конструкций* Российская Федерация. Патент № RU 2839370 C1.30 апреля 2025. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9f/f1/b7/ed39e3c9d207ee/RU2839370C1.pdf>
8. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Determining deformations of the central part of a vertical steel tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones. In *AIP Conference Proceedings*. 2016;(1772-1) 060011. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4964591>
9. Колесов И. Д. Проектирование в условиях карста. *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. 2025;(1-51):33–38.
10. Дробинина Е. В., Катаев В. Н. Изучение изменчивости физико-механических свойств перекрывающих отложений в карстологическом прогнозе. *Ученые записки крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология*. 2021; (7-2): 316–330.
11. Сердаров И. И., Хайрудинова С. С. Моделирование и анализ НДС стального цилиндрического резервуара под воздействием рабочих нагрузок. *Студенческий вестник*. 2019;(23-5):70–75.
12. Нуриев М. И., Порываев И. А., Авренюк А. Н., Сабилов Р. А., Потешкин П. В. Исследование влияния хлопунгов на напряженно-деформированное состояние конструкций резервуаров. *Нефтегазовое дело*. 2022;(2-20):94–101. <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-2-94-101>
13. Сорокина М. Н., Землеруб Л. Е., Терегулов М. Р. Монолитный сегментно-сферический фундамент для крупногабаритных РВС, оснащенный системой определения и предотвращения просадки грунта. *Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья*. 2024;(3-4):56–60. <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2024-3-4-56-60>
14. Семин А. С., Татьянников Д. А. Анализ методов устройства фундаментов на слабых основаниях для стальных вертикальных резервуаров. *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2020;(2):391–398.
15. Полищук А. И., Шмидт О. А. Развитие метода расчета осадок кольцевых свайных фундаментов резервуаров. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2021;(5):2–7.
16. Чепур П. В., Тарасенко А. А. Особенности деформирования крупногабаритных резервуаров со стационарной крышей при неосесимметричном воздействии ветровой нагрузки. *Фундаментальные исследования*. 2015;(12-1):97–102.
17. Tarasenko A. A., Konovalov P. A., Zekhniev F. F., Chepur P. V., Tarasenko D. A. Effects of nonuniform settlement of the outer bottom perimeter of a large tank on its stress-strain state. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017;(53-6):405–411. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9420-1>
18. Тарасенко А. А., Чепур П. В., Грученкова А. А. Определение действующих напряжений в полотношитах днищ резервуаров отечественных типоразмеров при локальных просадках оснований. *Фундаментальные исследования*. 2015;(2-8):1665–1670.

19. Тарасенко А. А., Чепур П. В. Особенности совместной работы кольцевого фундамента и грунтового основания при наличии зон неоднородности. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016; (4): 9–3.

References

1. Tarasenko A. A., Chepur P. V., Gruchenkova A. A. *Investigation of the patterns of development of uneven tank sediments by numerical methods*. Novosibirsk: Nauka; 2017. (In Russ.).
2. Andreenkov M. V. Tuganova A. A., Kolpakov M. A. The Concept of a Hybrid Technique for Geotechnical Monitoring of Structures in the Cryolithozone. In the collection: *Energy Saving and Innovative Technologies in the Fuel and Energy Complex: Proceedings of the National Scientific and Practical Conference* (December 18–19, 2025). Tyumen: TIU; 2025. Pp. 111–114. (In Russ.).
3. Gorban N. N., Vasi'ev G. G., Leonovich I. A. Tasks of forming a parametric system for ensuring the integrated safety of tank farms of marine terminal. *Oil industry*. 2024;(1):90–97. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2024-1-90-97>
4. Gar'kin I. N., Gar'kina I. A. *Technical expertise of buildings and structures*. Moscow: Pero; 2021. (In Russ.).
5. Tarasenko A. A., Chepur P. V., Gruchenkova A. A. Evaluation of technical condition of tanks with geometrical imperfections form wall. *Oil industry*. 2017;(6):118–121. (In Russ.). <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2017-6-118-121>
6. Voznesensky E. A. Geological hazards on the territory of Russia: their distribution and development prediction. *Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk*. 2024;(8):749–759. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869587324080061>
7. Konovalov V. B., Kashcheev R. L., Sarkisov S. V., Ruzibaev I. A., Kizhaev P. V., Dobryshkin E. O.[et al.]. *Device for Assessing the Technical Condition of Structures, Russian Federation*. Patent No. RU 2839370 C1.30 April 2025. (In Russ.). URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/9f/f1/b7/ed39e3c9d207ee/RU2839370C1.pdf>
8. Tarasenko A., Chepur P., Gruchenkova A. Determining deformations of the central part of a vertical steel tank in the presence of the subsoil base inhomogeneity zones. In *AIP Conference Proceedings*. 2016;(1772-1) 060011. AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4964591>
9. Kolesov I. D. Design in karst conditions. *Mashinostroenie i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2025;(1-51):33–38. (In Russ.).
10. Drobinina E. V., Kataev V. N. The study of the variability of the physico-mechanical properties of overlapping deposits in the karstological forecast. *Uchenye zapiski krymskogo federal'nogo universiteta imeni V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya*. 2021;(7-2):316–330. (In Russ.).
11. Serdarov I. I., Khajrudinova S. S. Modeling and analysis of SSS of a steel cylindrical tank under the influence of workloads. *Studencheskij vestnik*. 2019;(23-5):70–75. (In Russ.).
12. Nuriev M. I., Poryvaev I. A., Avrenyuk A. N., Sabirov R. A., Poteskin P. V. Investigation of the effect of claps on the stress-strain state of tank structures. *Petroleum engineering*. 2022;(2-20):94–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2022-2-94-101>.
13. Sorokina M. N., Zemlerub L. E., Teregulov M. R. Monolithic segmented spherical foundation for large tanks RVS, equipped with a system for detecting and preventing subsidence of soil. *Transport and storage of oil products and hydrocarbons*. 2024;(3-4):56–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.24412/0131-4270-2024-3-4-56-60>
14. Semin A. S., Tat'yannikov D. A. Analysis of methods of building foundations on weak foundations for vertical steel tanks. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika*. 2020;(2):391–398. (In Russ.).

15. Polishchuk A. I., Shmidt O. A. Method for calculating the settlement of circular pile foundations of a reservoir. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2021;(58-5):347–352. (In Russ.).
16. Chepur P. V., Tarasenko A. A. Features of fixed roof tanks deformation effect in axisymmetric wind load. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015;(12-1):97–102. (In Russ.).
17. Tarasenko A. A., Konovalov P. A., Zekhniev F. F., Chepur P. V., Tarasenko D. A. Effects of nonuniform settlement of the outer bottom perimeter of a large tank on its stress-strain state. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2017;(53-6):405–411. <https://doi.org/10.1007/s11204-017-9420-1>
18. Tarasenko A. A., Chepur P. V., Gruchenkova A. A. Determination of the operating stresses in the panels of the bottoms of tanks of domestic standard sizes with local subsidence of the bases. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2015;(2-8):1665–1670. (In Russ.).
19. Tarasenko A. A., Chepur P. V. Aspects of the joint operation of a ring foundation and a soil bed with zones of inhomogeneity present. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016;(53-4):238–243. (In Russ.).

Информация об авторах / Information about the authors

Чепур Петр Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой строительной механики, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, chepur_p_v@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6722-459X>. Web of Science Researcher ID: L-1887-2015. SCOPUS ID: 56491219700

Андреенков Максим Васильевич, студент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, maksimka.andreenkov@mail.ru.

Туганова Арина Андреевна, студент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Arisha.Tuganova@yandex.ru

Колпаков Матвей Алексеевич, студент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, matvey.0808@mail.ru

Лазарев Никита Андреевич, студент кафедры информационных технологий и прикладной математики, ТИ НИЯУ МИФИ, Россия, г. Лесной, zzzatoox@mail.ru

Petr V. Chepur, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, chepur_p_v@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6722-459X>. Web of Science Researcher ID: L-1887-2015. SCOPUS ID: 56491219700

Maksim V. Andreenkov, Student of the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, maksimka.andreenkov@mail.ru

Arina A. Tuganova, Student of the Department of Transportation of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, Arisha.Tuganova@yandex.ru

Matvey A. Kolpakov, Student of the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, matvey.0808@mail.ru

Nikita A. Lazarev, Student of the Department of Information Technology and Applied Mathematics, MEPhI National Research Nuclear University, Lesnoy, zzzatoox@mail.ru

Поступила в редакцию / Received 02.02.2026

Поступила после рецензирования / Revised 24.02.2026

Принята к публикации / Accepted 25.02.2026