

**ГИДРОТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО, ГИДРАВЛИКА И ИНЖЕНЕРНАЯ ГИДРОЛОГИЯ /
HYDRAULIC ENGINEERING, HYDRAULICS AND ENGINEERING HYDROLOGY**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.48>

**МЕТОДОЛОГИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ДИСКРЕТНО-ЭЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ГТС**

Научная статья

Шарапов Д.А.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-8650-2375;

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (sharapov.dm[at]gmail.com)

Аннотация

В исследовании рассматривается применение статистического контроля результатов численного моделирования ледовых нагрузок в гидротехническом строительстве. Актуальность темы обусловлена возрастающей значимостью точности и надежности численных расчетов, связанных с проектированием и эксплуатацией гидротехнических сооружений, которые подвергаются значительным нагрузкам от ледяных масс, в условиях Крайнего Севера. Основной целью работы является анализ методов статистического контроля, позволяющих выявлять и минимизировать неопределенности и ошибки в моделировании ледовых нагрузок. Рассматриваются различные статистические методы, включая контрольные карты, анализ чувствительности, которые могут быть использованы для мониторинга и управления процессами моделирования. Результаты направлены на улучшение методов численного моделирования и повышение уровня безопасности и устойчивости гидротехнических сооружений, что имеет особую значимость в условиях глобальных изменений климата.

Ключевые слова: гидротехническое строительство, ледовые нагрузки, численное моделирование, статистический контроль, контрольные карты, управление качеством, надежность расчетов, безопасность сооружений, проектирование, методы статистического анализа.

**METHODOLOGY OF STATISTICAL CONTROL OF DISCRETE-ELEMENT MODELLING OF ICE LOADS ON
HTC**

Research article

Sharapov D.A.^{1,*}

¹ ORCID : 0000-0001-8650-2375;

¹ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation

* Corresponding author (sharapov.dm[at]gmail.com)

Abstract

The study examines the application of statistical control of the results of numerical modelling of ice loads in hydraulic construction. The relevance of the topic is due to the increasing importance of accuracy and reliability of numerical calculations related to the design and operation of hydraulic structures, which are subjected to significant loads from ice masses, in the conditions of the Far North. The main objective of the work is to analyse statistical control methods that allow to identify and minimize uncertainties and errors in ice load modelling. Various statistical methods, including control charts, sensitivity analysis, which can be used to monitor and control modelling processes, are reviewed. The results are aimed at improving numerical modelling methods and increasing the level of safety and stability of hydraulic structures, which is of particular importance in the context of global climate change.

Keywords: hydraulic construction, ice loads, numerical modelling, statistical control, control charts, quality management, reliability of calculations, safety of structures, design, methods of statistical analysis.

Введение

Одним из приоритетных направлений развития России является освоение Арктики. Освоение этого региона невозможно без создания инфраструктуры, которая должна воспринимать суровые воздействия внешней среды. Морские портовые и шельфовые гидротехнические сооружений являются одними из основополагающих гидротехнических сооружений региона. Для данных сооружений ледовые нагрузки являются самыми большими и поэтому их правильное определение определяет весь проект, и, следовательно, важно совершенствовать методы их точного определения. Строительство гидротехнических объектов Арктики требует комплексного подхода, который включает не только проектирование и строительство, но и тщательное моделирование различных факторов, влияющих на функционирование этих сооружений. Ледовые нагрузки представляют собой сложный и динамичный фактор, который необходимо учитывать на всех этапах проектирования и эксплуатации гидротехнических сооружений. Лед может действовать на сооружения различными способами: давление, удар и другие.

В настоящее время в России используются нормативные подходы Российского морского регистра судоходства для плавающих объектов и Строительные правила (СП 38.1333.2018) для стационарных объектов, что серьезно уменьшает гибкость подходов к рассмотрению нестандартных модельных ситуаций.

Численные методы моделирования предоставляют мощные инструменты для анализа взаимодействия ледяных масс с конструкциями, но результаты таких расчетов подвержены неопределенностям, связанным как с моделированием, так и с входными данными.

В условиях постоянного развития технологий и методов анализа возникает необходимость в систематическом подходе к контролю и верификации результатов численного моделирования [1]. Статистический контроль представляет собой один из наиболее эффективных способов обеспечения надежности результатов моделирования. Он включает в себя использование различных методов и инструментов, таких как контрольные карты, анализ чувствительности и оценка неопределенности, что позволяет выявлять отклонения, ошибки и потенциальные риски, связанные с проектированием и эксплуатацией гидротехнических сооружений [2]. Применение статистического контроля результатов численных расчетов не только способствует повышению точности и достоверности моделирования, но и обеспечивает системный подход к управлению качеством на всех этапах – от проектирования до эксплуатации. Это особенно актуально в свете увеличения числа экстремальных климатических явлений, таких как изменения температуры и аномальные осадки. Исследование направлено на выявление эффективных методов и подходов, которые могут быть использованы для повышения надежности и точности расчетов, а также на рассмотрение влияния различных факторов на результаты моделирования. Рассмотрены современные подходы, которые позволяют обрабатывать и анализировать большие объемы данных, получаемых в ходе моделирования. Рассмотрена методология применения статистического контроля к результатам численных расчетов ледовых нагрузок, а также вопросы использования контрольных карт и других инструментов для мониторинга и управления процессами моделирования.

Целью работы является адаптация методов статистического контроля к дискретно-элементному моделированию ледовых нагрузок, что повысит качество результатов моделирования и поставит их обеспеченность на уровень достаточный для применения в качестве доказательной базы в целях выполнения технического регламента.

Задачами работы являются анализ исследований по теме статистического контроля в рассматриваемой области, описание основных определяющих критериев соответствия результатов моделирования, формулировка контрольных карт, которые возможно использовать для проверки результатов.

При подготовке работы были проанализированы ряд актуальных исследований. В работе [3] представлены исследования по повышению точности прогнозов. Обычно точность оценивается с помощью статистических метрик, однако высокие показатели точности не всегда обеспечивают оптимальные результаты в задачах управления. В данном исследовании на примере системы ледяного теплового накопителя проверяется связь между точностью прогнозов и эффективностью управления для 180 моделей прогнозирования, основанных на шести алгоритмах. Для оценки связи между метриками точности и управления используется коэффициент корреляции Спирмена. В работе [4] указано, что ледовые нагрузки – это основные внешние воздействия, возникающие при навигации в полярных регионах, которые могут нарушить безопасность судна и вызвать его повреждения. Для определения таких нагрузок на ледоколе «Сюэлун» провели измерения во время арктического рейса в августе 2017 года. Проанализировали два типичных случая взаимодействия судна с льдом и 306 экспериментальных случаев, в которых выделили 16 178 экстремальных значений нагрузок. Для анализа распределения экстремальных значений использовали модели Вейбулла, экспоненциальную и логнормальную, выбрав модель Вейбулла по тесту на качество. В работе [5] рассмотрен риск усталостного повреждения коленчатого вала судовых дизельных двигателей. Разработана система для испытаний усталостной долговечности, моделирующая условия работы подшипников, с гидравлическим контролем давления и многоплатформенным моделированием. В работе [6] при проектировании линий электропередач учитываются нагрузки от льда и ветра на лед, если риск обледенения значителен, строительные нормы не указывают точные значения для конкретных регионов, и калибровка таких нагрузок на основе надежности отсутствует. В этом исследовании проведена надежная калибровка коэффициентов комбинированных нагрузок на основе данных о толщине льда и скорости ветра с более чем 250 метеостанций в Канаде. В отличие от линейных задач, здесь необходимо учитывать нелинейную зависимость нагрузки от толщины льда. Исследованы также влияния разных периодов возвращаемости и корреляции между обледенением и ветром. В работе [7] предложена статистическая методика обработки сигнала для диагностики сгорания в режимах дизельного и двойного топлива. В работе [8] проведено численное моделирование и полевые испытания с реальными параметрами многостадийного гидроразрыва горизонтальных скважин. Результаты интересны в том числе с методологической точки зрения. В работе [9] предложен метод прогнозирующего управления на основе регионального адаптивного группового гидравлического баланса. Путем регулировки температуры на выходе тепловой станции и открытия клапанов у пользователей устраняется дисбаланс между спросом и предложением тепла. Разработан метод управления. В исследовании [10] использованы методы машинного обучения для корреляции петрофизических данных с каротажем. Реализована процедура для работы с данными каротажа с применением специальных алгоритмов. В работе [11] рассмотрены многокомпонентные потоки, которые распространены как в природных условиях, так и в инженерных приложениях, их анализ и количественная оценка представляют собой сложные задачи. Особенно сложным является одновременное измерение поля потока и количественная оценка поведения частиц. Методы, основанные на принципах Particle Image Velocimetry (PIV) и Particle Tracking Velocimetry (PTV), применяются для измерения полей потока и дисперсных фаз. В работе рассмотрены новые технологии PIV/PTV, где алгоритмы позволили добиться значительного прогресса в неинтрузивных измерениях многокомпонентных потоков. В статье [12] анализируются особенности разрушения верхних слоев и распределение характеристик горных землетрясений до и после эксперимента гидроразрыва с использованием полевого мониторинга и численного моделирования. В исследовании [13] был предложен индекс оценки стимуляции, учитывающий стимулированную площадь, разброс углового распределения и сложность пространственного изменения для 3D-сетей трещин после гидроразрыва туфового песчаника. В работе [14] для моделирования гидрографа использовалась модель NEC-HMS, а для реконструкции события и получения

характеристик наводнения — модель FLO-2D. Статистические функции связывали эти характеристики с уровнем показателями при наводнении в Китае. В исследовании [15] была разработана установка для контроля температуры и напряжений, проведены испытания сдвигового ползучества стальных труб в замороженном льду. Были охарактеризованы вязкоупругие и вязкопластичные поведения при различных температурах и сдвиговых напряжениях. Полученные данные дают теоретическую основу для инженерного проектирования в холодных регионах. В работе [16] рассмотрена пространственная изменчивость насыщенной гидравлической проводимости, которая обычно характеризуется геометрическим средним и коэффициентом вариации, а также моделью среднего значения инфильтрации, связанной с относительным коэффициентом вариации. В исследовании с использованием статистического подхода проведен анализ неопределенности для наборов данных, с определением минимального числа измерений для получения достаточно точных значений. В статье [17] указано, что из-за изменения климата арктические ледники тают, позволяя судам плавать летом, но в воде остаются льды, создающие нагрузку на корпус судна. Для правильного проектирования судна необходимо точно оценить напряжения в носовой части с использованием статистических методов. В этом исследовании применяется бивариантный метод надежности для оценки высоких нагрузок на носовую часть нефтяного танкера в Арктическом океане. Сначала рассчитывается распределение напряжений в носовой части, затем используется метод надежности для прогнозирования нагрузок при длительных возвратных периодах. В работе [18] указано, что предотвращение аварий в сложных гидротехнических системах должно быть частью управления и поддержки принятия решений. Традиционный подход, фокусирующийся на отказах компонентов или человеческой ошибке, часто игнорирует другие причины, такие как ошибки на стадии проектирования и управления. В статье рассматривается использование моделей STAMP и STRA для анализа работы ГЭС Пирот. Несмотря на отсутствие отказов рассматриваемой системы, поднятые в статье вопросы безопасности, могут быть адаптированы для совершенствования подходов к проектированию в России.

Методы и методология

2.1. Метод дискретных элементов в ГТС

Использование дискретно-элементного моделирования (DEM) для оценки ледовых нагрузок имеет важное значение для инженерных задач, связанных с проектированием морских сооружений и других конструкций, взаимодействующих с ледовыми полями. Данный метод предоставляет более детализированное представление о механизме разрушения льда, его взаимодействии с сооружениями, а также позволяет предсказывать нагрузку, которую лед оказывает на конструкцию. DEM позволяет учитывать сложные процессы, такие как разрушение и дробление ледяных масс, а также их последующее движение под воздействием внешних сил. Эти процессы трудно описать с помощью непрерывных моделей, но DEM может учесть индивидуальное поведение каждого отдельного фрагмента льда и его взаимодействие с другими частицами, обеспечивая более реалистичное моделирование. Лед обладает анизотропной структурой и специфическими механическими свойствами, которые зависят от температуры, концентрации солей и давления. DEM позволяет моделировать ледяные частицы как отдельные элементы, наделяя их индивидуальными физико-механическими характеристиками, что важно для точного предсказания ледовых нагрузок. Одной из ключевых особенностей DEM является возможность моделировать процесс разрушения льда на уровне отдельных кусков и фрагментов. Это критично для оценки нагрузки, так как разрушение льда часто приводит к резким изменениям напряжений и давления на конструкции. DEM позволяет строить модели, которые могут быть откалиброваны и подтверждены на основе лабораторных экспериментов и данных полевых исследований. Взаимодействие льда с конструкцией зачастую включает динамические и нестационарные нагрузки, связанные с движением льдин, изменением направления течения, ветровых нагрузок и температуры. DEM позволяет учитывать эти динамические эффекты и оценивать распределение нагрузок в реальном времени.

2.2. Статистический контроль результатов численного моделирования

Применение статистического контроля к результатам численного моделирования необходимо для обеспечения их надежности, точности и согласованности. Численное моделирование всегда связано с неопределенностями из-за ограничений численных методов, погрешностей исходных данных и вариативности параметров модели. Статистический контроль позволяет количественно оценить эти неопределенности и снизить риск ошибок в интерпретации результатов моделирования. При численном моделировании важна сходимость решения при изменении шагов по времени или по пространству. Статистический анализ позволяет проверить, что изменение шага или сетки не влияет существенно на результаты. Оценка сходимости может быть выполнена с помощью расчета среднеквадратичного отклонения результатов для различных сеток или шагов. Например, при уменьшении шага по времени можно сравнивать результаты и анализировать, как варьируются ключевые показатели. Статистический анализ чувствительности позволяет выявить, какие параметры модели вносят наибольший вклад в результат моделирования. Это важно для оптимизации параметров модели и для идентификации наиболее значимых факторов. В таких случаях применяются методы, например, метод Монте-Карло, который помогает провести многофакторный анализ чувствительности. Оценка дисперсий выходных данных относительно изменения входных параметров позволяет увидеть, какие параметры требуют более точного контроля. Воспроизводимость результатов численного моделирования является критерием качества модели. Для этого часто проводят серию вычислений при различных начальных условиях или при случайных вариациях параметров. Сравнение нескольких наборов результатов позволяет оценить стабильность модели и определить уровень систематической и случайной погрешности. Используя статистические методы, такие как дисперсионный анализ, можно оценить, насколько результаты воспроизводимы и какие из них выходят за пределы ожидаемых значений. Для каждого результата моделирования можно рассчитать доверительные интервалы, что позволяет учесть возможные колебания значений. Этот подход особенно важен, если модель использует стохастические методы или если параметры имеют статистически неопределенные значения.

2.3. Статистический контроль в ГТС

Статистический контроль результатов моделирования в гидротехническом строительстве является важным инструментом для обеспечения надежности и безопасности проектируемых объектов. При моделировании поведения дамб и плотин под воздействием воды и ледяных нагрузок важно оценить вероятность их устойчивости. Статистический контроль позволяет анализировать результаты гидродинамических и механических расчетов, проверять устойчивость сооружений и выявлять потенциальные риски их разрушения. Моделирование наводнений, оценка уровня затопления и риск различных сценариев (например, при сильных дождях или разрушении плотин) требуют применения статистических методов. Использование исторических данных о наводнениях и метеорологических условиях позволяет оценить вероятность затопления определенных участков и скорректировать проектные решения. Статистический контроль помогает анализировать результаты испытаний прочности материалов в гидротехническом строительстве и оценивать их долговечность при различных условиях эксплуатации. Анализ результатов испытаний образцов бетона или грунта может помочь выявить отклонения от проектных характеристик, что позволит предпринять меры для улучшения качества. Статистический анализ позволяет оценивать данные мониторинга, такие как изменения в качестве воды, уровень загрязнения и влияние на местную флору и фауну. Статистический контроль результатов моделирования эрозионных процессов и устойчивости берегов под воздействием волн и течений позволяет оценивать эффективность берегозащитных сооружений.

Ключевые методологии, которые могут быть применены при статистическом контроле результатов численных расчетов включают:

1. Методы описательной статистики.
2. Анализ чувствительности (средние значения, стандартное отклонение, метод Монте-Карло).
3. Методы регрессионного анализа.
4. Контрольные карты.
5. Валидация результатов.
6. Другие.

Средние значения и медианы – используются для представления центральной тенденции результатов численных расчетов.

Стандартное отклонение и дисперсия – позволяют оценить вариативность и разброс значений, что помогает понять уровень неопределенности результатов.

Метод Монте-Карло – позволяет исследовать, как изменения входных параметров влияют на результаты модели. Случайные значения параметров выбираются из заданных распределений, что позволяет создать широкий спектр сценариев.

Линейная и нелинейная регрессия используются для выявления зависимостей между переменными и предсказания значений на основе входных данных.

Контрольные карты применяются для мониторинга процесса моделирования во времени и выявления отклонений от ожидаемых значений.

Протоколы валидации представляют собой описание методов проверки, которые были использованы для оценки достоверности результатов, включая сравнение с экспериментальными данными.

2.4. Контрольные карты

Контрольные карты представляют собой важный инструмент статистического управления процессами и могут быть успешно применены для мониторинга и управления процессом численного моделирования ледовых нагрузок в гидротехническом строительстве (Рисунок 1).

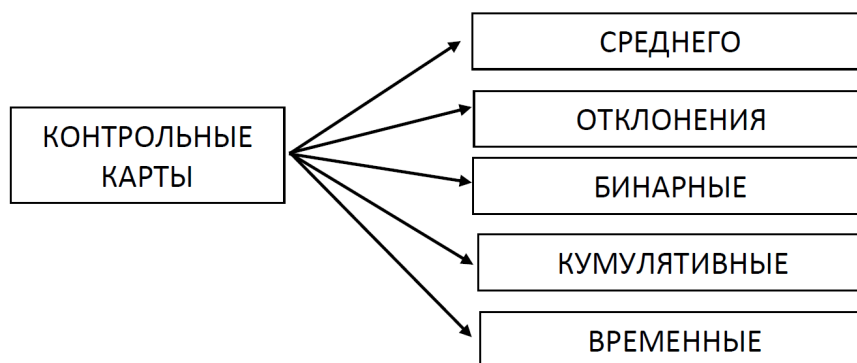


Рисунок 1 - Контрольные карты статистического контроля дискретно-элементного моделирования ледовых нагрузок на ГТС

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.48.1>

1. Контрольные карты среднего используются для отслеживания изменений в средних значениях результатов моделирования. Подходят для мониторинга стабильности моделей, обеспечивающих расчет ледовых нагрузок. Изменения в средних значениях могут указывать на изменения в условиях моделирования или параметрах, влияющих на результаты.

2. Контрольные карты среднеквадратичного отклонения используются для контроля вариативности результатов расчетов, что позволяет оценить надежность моделирования. Данные карты могут помочь выявить изменения в

устойчивости численных расчетов при различных условиях ледовых нагрузок, например, при изменении параметров среды или модели.

3. Контрольные карты для бинарных и категориальных данных предназначены для мониторинга бинарных (например, наличие или отсутствие определенных условий) или категориальных (например, типы льда) данных.

4. Контрольные кумулятивные карты отслеживают накопленную сумму отклонений от заданного целевого значения. Они эффективны для выявления малозаметных изменений в процессе моделирования ледовых нагрузок, что позволяет быстро реагировать на отклонения и поддерживать качество моделирования.

5. Контрольные карты по временным интервалам отслеживают изменения результатов в зависимости от времени, что позволяет оценивать динамику процесса. Их можно использовать для мониторинга изменений ледовых нагрузок в зависимости от времени года или условий окружающей среды.

Использование контрольных карт в процессе численного моделирования ледовых нагрузок в гидротехническом строительстве позволяет обеспечить постоянный мониторинг стабильности и точности моделей, что помогает выявлять отклонения и управлять процессом, и способствует повышению доверия к результатам численных расчетов, что крайне важно для обеспечения надежности проектируемых гидротехнических сооружений.

Заключение

В результате выполнения работы были выполнены поставленные задачи для заявленной достижения цели.

1. Анализ источников литературы показал, что отсутствуют работы, в которых прямо разбирается рассматриваемая проблема. Тем не менее для некоторых сооружений предпринимались попытки внедрить методы статистического контроля, что описывается в проделанном обзоре литературе и подтверждает общую правомочность методов статистического контроля к дискретно-элементному моделированию ледовых нагрузок на гидротехнические сооружения Арктики.

2. Приведены основные критерии и методологии, которые могут быть использованы для статистического контроля результатов дискретно-элементной модели ледового воздействия.

3. Сформулированы контрольные карты для анализа результатов дискретно-элементного моделирования ледовых нагрузок. Использование контрольных карт позволяет обеспечить мониторинг стабильности и точности моделей, что помогает выявлять отклонения и способствует повышению доверия к результатам численных расчетов, что крайне важно для обеспечения надежности проектируемых гидротехнических сооружений.

4. Применение статистических методов и контрольных карт позволит инженерам и исследователям систематически отслеживать и анализировать результаты численных расчетов, что помогает выявлять и минимизировать ошибки и неопределенности. В частности, контрольные карты, такие как карты среднего, карты среднеквадратичного отклонения предоставляют мощные инструменты для мониторинга процессов моделирования во времени и выявления отклонений, которые могут указывать на изменения в условиях расчетов или в самой модели. Эти инструменты позволяют осуществлять более раннее обнаружение потенциальных проблем, что критически важно в условиях динамичного и изменчивого окружающего мира.

5. Анализ чувствительности, как метод статистического контроля, также важен в процессе моделирования ледовых нагрузок. Он позволяет исследовать, какие параметры модели оказывают наибольшее влияние на результаты, и тем самым дает возможность сосредоточить усилия на контроле и улучшении наиболее значимых факторов. Это повышает надежность расчетов и делает процесс моделирования более целенаправленным и эффективным. Использование методов, таких как метод Монте-Карло, позволяет строить полные и реалистичные модели, которые отражают разнообразие возможных сценариев, тем самым уменьшая вероятность негативных последствий.

Важно отметить, что применение статистического контроля не ограничивается только этапом проектирования. Он также имеет значение на стадии эксплуатации гидротехнических сооружений. Мониторинг и анализ эксплуатационных данных с использованием статистических методов позволяет выявлять изменения в поведении конструкций и их взаимодействии с ледовыми массами. Это способствует раннему выявлению потенциальных проблем и принятия мер для их устранения, что, в свою очередь, повышает безопасность и долговечность сооружений.

Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-20062 и Санкт-Петербургского научного фонда, соглашение № 23-19-20062.

Благодарности

Автор выражает благодарность сотрудникам Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства (ранее кафедра гидротехнического строительства) Инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ).

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Funding

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 23-19-20062 and the St. Petersburg Science Foundation, agreement No. 23-19-20062.

Acknowledgement

The author expresses their gratitude to the staff of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering Construction (formerly the Department of Hydraulic Engineering Construction) of the Engineering and Construction Institute of Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU).

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Sharapov D. Evolution of ice load prediction tools for hydrotechnical construction / D. Sharapov // E3S Web of Conferences. — 2023. — № 402. — P. 05023. — DOI: 10.1051/e3sconf/202340205023.
2. Sharapov D. Improving quality of 2D ice load estimation on frozen piles / D. Sharapov, Y. Klochkov // International Journal for Quality Research. — 2023. — № 17(4). — P. 1141–1150. — DOI: 10.24874/IJQR17.04-11.
3. Wang X. Investigating the deviation between prediction accuracy metrics and control performance metrics in the context of an ice-based thermal energy storage system / X. Wang, X. Liu, Y. Wang [et al.] // Journal of Energy Storage. — 2024. — № 91. — P. 112126. — DOI: 10.1016/j.est.2024.112126.
4. Wu G. Statistical analysis of ice loads on ship hull measured during Arctic navigations / G. Wu, S. Kong, W. Tang [et al.] // Ocean Engineering. — 2021. — № 223. — P. 108642. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108642.
5. Chen G. Design and research of a heavy load fatigue test system based on hydraulic control for full-size marine low-speed diesel engine bearings / G. Chen, Y. Wang, N. Zhong [et al.] // Ocean Engineering. — 2023. — № 288. — Pt. 2. — P. 116174. — DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.116174.
6. Hong H.P. Reliability-based calibration of companion load combination factors by considering concurrent wind and ice loading for structural design / H.P. Hong, Y.X. Liu, W.X. Zhou // Structural Safety. — 2020. — № 109. — P. 102478. — DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102478.
7. Cuisano J. In-cylinder pressure statistical analysis and digital signal processing methods for studying the combustion of a natural gas/diesel heavy-duty engine at low load conditions / J. Cuisano, F. Flores, L. Chirinos [et al.] // Energy Conversion and Management. — 2022. — № 269. — P. 116089. — DOI: 10.1016/j.enconman.2022.116089.
8. Zhuang J. Multistage hydraulic fracturing of a horizontal well for hard roof related coal burst control: Insights from numerical modelling to field application / J. Zhuang, Z. Mu, W. Cai [et al.] // International Journal of Mining Science and Technology. — 2024. — № 34 (8). — P. 1095–1114. — DOI: 10.1016/j.ijmst.2024.08.008.
9. Guo C. Informer-based model predictive control framework considering group controlled hydraulic balance model to improve the precision of client heat load control in district heating system / C. Guo, J. Zhang, H. Yuan [et al.] // Applied Energy. — 2024. — № 373. — P. 123951. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123951.
10. Farzi R. Intelligent and statistical analysis to estimating the hydraulic flow units: A case study from the Kupal oilfield, SW Iran / R. Farzi, V. Bolandi, S. Yarmohammadi [et al.] // Journal of Applied Geophysics. — 2022. — № 206. — P. 104814. — DOI: 10.1016/j.jappgeo.2022.104814.
11. Seyfi S. Simultaneous flow and particle measurements for multiphase flows in hydraulic engineering: A review and synthesis of current state / S. Seyfi, S. Karimpour, R. Balachandar // Flow Measurement and Instrumentation. — 2024. — № 99. — P. 102666. — DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2024.102666.
12. Zou J. Mechanism of hydraulic fracturing for controlling strong mining-induced earth-quakes induced by coal mining / J. Zou, Q. Zhang, Y. Jiang [et al.] // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. — 2024. — № 181. — P. 105840. — DOI: 10.1016/j.ijrmms.2024.105840.
13. Yang H. Visualization and quantitative statistics of experimental hydraulic fracture network based on optical scanning / H. Yang, L. Wang, C. Yang [et al.] // Journal of Natural Gas Science and Engineering. — 2022. — № 105. — P. 104718. — DOI: 10.1016/j.jngse.2022.104718.
14. Liu T. Using statistical functions and hydro-hydraulic models to develop human vulnerability curves for flash floods: The flash flood of the Taitou catchment (China) in 2016 / T. Liu, Y. Wang, H. Yu [et al.] // International Journal of Disaster Risk Reduction. — 2022. — № 73. — P. 102876. — DOI: 10.1016/j.ijdrr.2022.102876.
15. Gao Q. A novel method for investigating ice-substrate interfacial rheology and long-term adfreeze strength through loading-unloading creep test / Q. Gao, F. Wang, Z. Zhou [et al.] // Case Studies in Construction Materials. — 2024. — № 21. — P. e03703. — DOI: 10.1016/j.cscm.2024.e03703.
16. Flammini A. A statistical approach for the assessment of the saturated hydraulic conductivity applied to an Austrian region / A. Flammini, R. Morbidelli, C. Corradini [et al.] // Journal of Hydrology: Regional Studies. — 2023. — № 45. — P. 101310. — DOI: 10.1016/j.ejrh.2022.101310.
17. Zhang J. Operational reliability study of ice loads acting on oil tanker bow / J. Zhang, O. Gaidai, H. Ji [et al.] // Heliyon. — 2023. — № 9 (4). — P. e15189. — DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15189.
18. Šotić A. From Component Failure to Hydraulic Engineering Complex System Safety / A. Šotić, M. Ivetić // Procedia Structural Integrity. — 2023. — № 48. — P. 266–273. — DOI: 10.1016/j.prostr.2023.07.133.