

УДК 658.5

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК НА ГИДРОТЕХНИЧЕСКИЕ СООРУЖЕНИЯ

© 2023 Д.А. Шарапов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(национальный исследовательский университет), г. Санкт-Петербург, Россия

Статья поступила в редакцию 01.07.2023

В статье рассматриваются вопросы исторического развития методов оценки ледовой нагрузки на гидротехнические сооружения. Приводится обоснование важности расчета ледовых нагрузок для безопасности и надежности морских сооружений в холодном климате. Статья указывает на наличие старых эмпирических методов расчета ледовой нагрузки и приводит текущее состояние методов в данной области. Разработка международных стандартов и руководств по оценке ледовой нагрузки приводится как пример развития этой области знания. Указываются методы, использовавшиеся для оценки ледовой нагрузки до разработки современных стандартов, подчеркиваются их ограничения и зависимость от эмпирических данных. Применение современных численных методов, в том числе метода дискретных элементов (МДЭ), обеспечивающего более точные и надежные оценки ледовых нагрузок на морские сооружения, представляется значительным шагом вперед в оценке данных нагрузок. В статье упоминаются преимущества МДЭ перед традиционными методами а также рассматриваются современные программные пакеты, которые можно использовать для дискретного моделирования ледовых нагрузок на морские сооружения, включая коммерческие варианты и варианты с открытым исходным кодом. В заключение подчеркивается необходимость постоянного совершенствования расчетных методов, так это напрямую влияет не только на стоимость, но и на надежность и безопасность морских гидротехнических сооружений. *Ключевые слова:* ледовая нагрузка, гидротехническое сооружение, развитие расчетного метода, численные методы, ISO 19906, МДЭ.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-92-97
EDN: BVKZIV

Проект выполняется при поддержке Минобрнауки России

«Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования (FSEG-2020-0021)»

ВВЕДЕНИЕ

Морские гидротехнические сооружения, такие как нефтяные платформы, ветровые электроустановки и причалы, подвергаются воздействию окружающей среды, включая ветровые нагрузки, волновые нагрузки и нагрузки от течений. Тем не менее, если рассматривается сооружение на Арктическом шельфе, то одной из самых главных нагрузок, воздействующих на сооружения в холодном климате, будет именно ледовая нагрузка. Ледовые нагрузки могут быть непредсказуемыми в силу большого их разнообразия, поэтому развитие и совершенствование методов определения ледовых нагрузок имеет важное значение при проектировании. Отсутствие нормативного подхода для многих сценариев ледового воздействия может негативно сказываться на надежности и прочности сооружений Арктики. Ошибки в определении

ледовой нагрузки могут иметь негативные последствия, в том числе выражающиеся в возможных структурных повреждениях, снижении надежности, увеличение затрат на техническое обслуживание и даже авариям и возникновении опасности для персонала.

Одной из особенностей расчета ледовых воздействий на морские сооружения является сложный характер льда как материала [1,2]. На свойства льда, как материала взаимодействующего с сооружением, влияют температура, соленость, ветер и течения. Характеристики льда могут сильно различаться даже в пределах одного ледового поля и могут оказывать значительное влияние на ледовые нагрузки. Это затрудняет прогнозирование ледовых нагрузок на морские сооружения и требует использования специализированных инструментов и методов.

Ошибки в определении ледовой нагрузки могут иметь серьезные последствия. в Морская нефтяная буровая платформа «Ocean Ranger» в Северной Атлантике в 1982, затонула во время шторма, в том числе имеющего ледовую состав-

Шарапов Дмитрий Андреевич, кандидат наук, доцент Высшей школы гидротехнического и энергетического строительства. E-mail: sharapov.dm@gmail.com

ляющую нагрузки. Инцидент привел к гибели экипажа и подчеркнул важность учета ледовых нагрузок при проектировании морских сооружений. Расследование катастрофы Ocean Ranger показало, что платформа не была рассчитана на возникшие в тот момент ледовые нагрузки.

Существует несколько методов расчета ледовых нагрузок на морские сооружения. Эти методы можно разделить на две категории: аналитические методы и численные методы. Аналитические методы используют упрощенные математические модели для прогнозирования ледовых нагрузок, тогда как численные методы могут более детально моделировать поведение льда, но требуют больших вычислительных ресурсов и сложных моделей поведения материала.

Существуют руководства и стандарты по проектированию морских сооружений в условиях Арктики, в том числе стандарт ISO 19906:2019 [3]. Проектирование ледостойких конструкций обычно включает в себя проектирование либо на расчетные ледовые нагрузки, либо устройство специальных заграждений ото льда (в этом случае данные ледозащитные сооружения тоже должны быть рассчитаны на нагрузки ото льда). Важную роль играют заложенные в проекте стратегии по борьбе со льдом (управлению ледовой обстановкой).

До разработки стандартных руководств и правил расчет ледовых нагрузок на морские сооружения в значительной степени основывался на эмпирических данных и опыте. Инженеры и проектировщики полагались на прошлый опыт и наблюдения за поведением льда, чтобы оценить силы, с которыми лед может воздействовать на конструкции. Хотя этот подход был в некоторой степени эффективным, он имел ограниченную точность и часто приводил к консервативным оценкам, которые могли привести к излишне надежным структурам, необоснованным с экономической точки зрения.

Одним из наиболее часто используемых методов расчета ледовых нагрузок в прошлом был метод эмпирических формул. Этот подход был основан на наборе уравнений, связывающих ледовую нагрузку с толщиной льда, скоростью и другими факторами окружающей среды. Эти формулы были разработаны на основе наблюдений и измерений поведения льда в различных районах и условиях [4]. Однако, эмпирический подход имел несколько ограничений. Во-первых, уравнения часто были специфичны для определенных регионов и не могли быть перенесены на другие районы. Во-вторых, в формулах не учитывалось сложное поведение льда в различных условиях, например образование торосов или влияние температуры и солености на свойства льда. Наконец, подход был ограничен конструкциями с простой геометрией и не мог

использоваться для прогнозирования ледовых нагрузок на сложные конструкции [5]. Аналитический метод включал использование простых математических моделей для прогнозирования поведения льда и сил, которые он будет оказывать на конструкции. Модели часто основывались на идеализированных предположениях о поведении льда, таких как предположение об одинаковой толщине льда или постоянной скорости льда. Точность аналитического метода была ограничена, и он часто не учитывал сложное поведение льда в реальных условиях [6].

Использование опыта и прошлых аналогичных наблюдений за поведением льда ранее являлось одним из частых подходов к строительству сооружений в отдаленных местах, где данные о поведении льда были ограничены или отсутствовали. Строители приезжали на место, наблюдали за ледовой обстановкой и делали оценки на основе своего опыта и наблюдений. Хотя этот подход был полезен, он был очень субъективным и мог привести к противоречивым методам проектирования [7].

Ограничения этих методов стали очевидны по мере роста количества проектов на арктическом шельфе в 20 веке. С освоением морских нефтегазовых ресурсов в суровых условиях возрастала потребность в более точных и надежных методах расчета ледовых нагрузок на сооружения. Отсутствие стандартизированных руководств и правил затрудняло обеспечение последовательной и безопасной практики проектирования.

В ответ на эти вызовы такие организации, как Международная организация по стандартизации (ИСО), разработали правила проектирования морских сооружений в Арктических регионах. Эти руководящие принципы включали возможность использования более совершенных численных моделей, которые могли предсказать сложное поведение льда и обеспечивать более точные прогнозы ледовых нагрузок в различных условиях окружающей среды [3].

Ограничения этих методов стали очевидны по мере увеличения объемов разработки морских месторождений в суровых условиях. Разработка стандартизированных руководств и правил, основанных на более совершенных численных моделях, помогла обеспечить последовательные и безопасные методы проектирования морских сооружений в покрытых льдом водах.

РАЗВИТИЕ РАСЧЕТНОГО МЕТОДА

Расчет ледовых нагрузок на морские сооружения является развивающейся областью, с течением времени происходят изменения в нормах и стандартах. В прошлом расчеты ледовых

нагрузок в значительной степени основывались на эмпирических данных и опыте, а стандарты и рекомендации были ограничены по объему. Однако, достижения в области технологий и научного понимания привели к значительным изменениям в методах и нормах расчета ледовой нагрузки.

Одним из наиболее существенных изменений в нормах расчета ледовой нагрузки стал переход на использование численных моделей. В прошлом для расчета ледовых нагрузок на конструкции обычно использовались аналитические методы. Эти методы были основаны на простых математических моделях, основанных на эмпирических данных и опыте для прогнозирования. Однако точность этих моделей была ограничена, и они часто не учитывали сложное поведение льда в реальных условиях.

Достижения в вычислительной мощности и программном обеспечении для моделирования позволили разработать более точные численные модели для прогнозирования ледовых нагрузок на морские сооружения. Эти модели могут более детально имитировать поведение льда, включая такие факторы, как образование льда, дрейф, давление и торосистость. Численные модели также позволяют анализировать сложные конструкции с несколькими вариантами нагрузки и могут обеспечить более точные прогнозы ледовых нагрузок в различных условиях окружающей среды.

Еще одним изменением в нормах расчета ледовой нагрузки стала разработка стандартизированных руководств и стандартов по проектированию. В прошлом проектирование морских сооружений в покрытых льдом водах часто основывалось на опыте и специальных методах без каких-либо стандартных руководств или правил. Это привело к несоответствиям в методах проектирования и сегодня, часто, подобные сооружения, не соответствуют необходимым стандартам надежности и безопасности.

Разработка стандартизированных руководств и правил помогла повысить безопасность и надежность морских сооружений в покрытых льдом водах. Например, Международная организация по стандартизации (ISO) разработала стандарт ISO 19906:2019 [3] для проектирования морских сооружений в покрытых льдом водах. Этот стандарт содержит рекомендации по проектированию конструкций, способных выдерживать ледовые нагрузки, и включает стратегии управления ледовой обстановкой.

В дополнение к изменениям в численном моделировании и стандартизированных руководящих принципах также были достигнуты успехи в измерении и мониторинге ледовых нагрузок на морские сооружения. В прошлом было сложно точно измерять и контролировать ледо-

вые нагрузки на конструкции, что затрудняло проверку точности расчетов ледовых нагрузок. Однако достижения в сенсорных технологиях и системах сбора данных позволили измерять и отслеживать ледовые нагрузки в режиме реального времени, что позволяет лучше верифицировать расчеты ледовых нагрузок.

Использование технологий дистанционного зондирования, таких как спутниковые изображения и данные радаров, также улучшило возможности мониторинга ледовой обстановки и прогнозирования ледовых нагрузок на конструкции. Эта технология может предоставить информацию о толщине, концентрации и движении льда, которую можно использовать для проверки расчетов ледовой нагрузки и обоснования проектных решений.

Существенным шагом вперед в оценке ледовых нагрузок на сооружения стало развитие численного моделирования. Численные модели, в приложении к моделированию ледовых нагрузок, можно условно разделить на две категории: модели основанные на конечных элементах (МКЭ) или разностях (МКР) и модели основанные на дискретных элементах (МДЭ) (рис. 1). МКЭ делят конструкцию и окружающий лед на более мелкие элементы и определяют силы и напряжения, действующие на каждый элемент. Этот подход особенно полезен для конструкций со сложной геометрией, поскольку он может точно учитывать распределение сил и напряжений по всей конструкции [8]. МДЭ, с другой стороны, представляют лед как набор дискретных частиц, каждая из которых имеет свои свойства и законы взаимодействия с окружающими частицами. Этот подход особенно полезен для моделирования образования развития трещин и разрушения льда и сложных ледовых образований [9].

В дополнение к численному моделированию достижения в технологии измерений также стали значительным шагом вперед в оценке ледовых нагрузок на конструкции. Традиционные методы измерения ледовых нагрузок заключались в размещении датчиков на конструкции и регистрации сил, действующих на лед. Однако этот подход часто ограничивается сложностью взаимодействия льда и конструкции и трудностью получения точных измерений в суровых условиях. Последние достижения в технологии измерений, такие как лазерное сканирование и цифровая корреляция изображений, позволяют проводить более подробные и точные измерения деформации и деформации конструкции под ледовыми нагрузками [10]. Эта информация может быть использована для проверки численных моделей и повышения их точности.

В целом развитие численного моделирования, достижения в технологии измерения и соз-

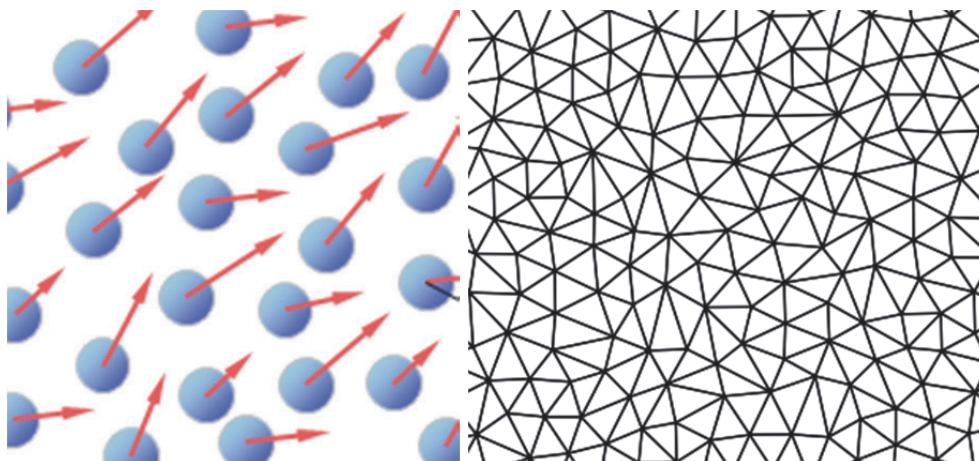


Рис. 1. Дискретно-элементная модель (слева), конечно-элементная модель (справа)

дание стандартизированных руководств и правил стали значительным шагом вперед в оценке ледовых нагрузок на сооружения. Численные модели позволяют гораздо более подробно и точно представить поведение льда, а также его взаимодействие с конструкциями. Разбивая задачу на более мелкие компоненты и решая их численно, можно учитывать широкий диапазон условий окружающей среды и вариации поведения льда. Это делает численные модели особенно полезными для прогнозирования ледовых нагрузок на сложные конструкции в суровых условиях, например, на морские нефтегазовые платформы или морские ветровые генераторы.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Метод дискретных элементов (МДЭ) — это численный метод, используемый для моделирования поведения гранулированных материалов, включая частицы льда. Модели МДЭ можно использовать для оценки ледовых нагрузок на морские сооружения и других инженерных приложений. Для моделирования МДЭ доступно несколько программных пакетов, включая коммерческие программы и программы с открытым исходным кодом.

Одним из наиболее широко используемых коммерческих пакетов программного обеспечения для моделирования МДЭ является EDEM. EDEM — это программное обеспечение для мультифизического моделирования, которое позволяет пользователям моделировать поведение гранулированных материалов, включая частицы льда. Он предоставляет расширенные возможности для моделирования сложных форм и взаимодействий между частицами и структурами. EDEM использовался для различных инженерных приложений, включая горнодобывающую промышленность и строительство.

Еще одним коммерческим программным пакетом, который можно использовать для моделирования МДЭ, является Rocky DEM. Rocky

DEM — это инструмент для моделирования поведения гранулированных материалов, который можно использовать для различных инженерных приложений, включая горнодобывающую промышленность. Rocky DEM предоставляет удобный интерфейс и расширенные функции для моделирования сложных форм и взаимодействий между частицами и структурами.

В дополнение к коммерческим пакетам программного обеспечения для моделирования МДЭ доступно несколько программ с открытым исходным кодом. LIGGGHTS — это программное обеспечение для моделирования МДЭ с открытым исходным кодом, которое позволяет пользователям моделировать поведение гранулированных материалов. Программа предоставляет расширенные возможности для моделирования взаимодействий частица-частица, взаимодействия частица-жидкость и взаимодействия частица-структура.

Еще одним программным пакетом с открытым исходным кодом, который можно использовать для моделирования МДЭ, является YADE. YADE — это программное обеспечение для моделирования МДЭ, которое предоставляет расширенные функции для моделирования гранулированных материалов, включая частицы льда. YADE позволяет пользователям моделировать поведение больших систем сложной формы и взаимодействий между частицами и структурами.

Эти программные пакеты могут использоваться для дискретного моделирования ледовых нагрузок на морские сооружения. Возможности программы позволяют моделировать поведение гранулированных материалов, включая частицы льда, и предоставляют задавать расширенные функции для моделирования сложных форм и взаимодействий между частицами и структурами. Пакеты коммерческого программного обеспечения, такие как EDEM и Rocky DEM, широко используются для различных инженерных приложений, в то время как программы с открытым исходным кодом, такие как LIGGGHTS и YADE,

предоставляют альтернативу исследователям и разработчикам, которым требуется более гибкое и настраиваемое решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения имеет решающее значение для безопасности и надежности этих сооружений. За последние несколько десятилетий оценка ледовых нагрузок претерпела значительные изменения: от упрощенных эмпирических моделей прошлого к более сложным численным моделям, основанным на принципах физики и механики. Разработка международных стандартов и руководств внесла значительный вклад в стандартизацию расчетов ледовой нагрузки, обеспечив согласованность и точность проектирования морских сооружений.

Одним из важных шагов вперед в оценке ледовой нагрузки стало применение метода дискретных элементов (МДЭ). Моделирование МДЭ моделирует поведение сыпучих материалов, включая частицы льда, обеспечивая более точную и надежную оценку ледовых нагрузок на морские конструкции. МДЭ предлагает несколько преимуществ по сравнению с традиционными методами, включая возможность моделирования сложных форм и взаимодействий между частицами и структурами.

Кроме того, современные пакеты программного обеспечения, как коммерческие, так и с открытым исходным кодом, упростили реализацию моделирования МДЭ для оценки ледовой нагрузки. EDEM и Rocky DEM — два широко используемых коммерческих пакета программного обеспечения, которые предоставляют расширенные возможности для моделирования сложных форм и взаимодействий между частицами и структурами. LIGGGHTS и YADE — это программные пакеты с открытым исходным кодом, которые предоставляют исследователям и разработчикам более настраиваемое и гибкое решение.

Разработка передовых моделей и программного обеспечения для оценки ледовой нагрузки произвела революцию в проектировании и строительстве морских сооружений, обеспечив их безопасность и надежность в экстремальных условиях. Поскольку отрасль продолжает развиваться, важно оставаться в авангарде новейших технологий и методов, гарантируя, что морские сооружения спроектированы и построены в соответствии с самыми высокими стандартами безопасности и надежности.

Будущие достижения в области оценки ледовых нагрузок могут включать разработку алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта для повышения точности и эффек-

тивности моделирования ледовых нагрузок. Эти методы могут обеспечить более полное моделирование поведения льда и его взаимодействия с конструкциями. Кроме того, достижения в технологиях дистанционного зондирования, таких как LiDAR и спутниковые изображения, могут обеспечить более точные измерения толщины и свойств льда, что приведет к более точному моделированию ледовой нагрузки.

Поскольку спрос на морские сооружения продолжает расти, важно уделять первоочередное внимание безопасности и надежности этих сооружений. Правильный расчет ледовых нагрузок является важным аспектом обеспечения целостности этих конструкций в экстремальных условиях. Достижения в области оценки ледовой нагрузки, обсуждаемые в этом тексте, обеспечивают прочную основу для будущего развития морских сооружений и текущих усилий по обеспечению их безопасности и надежности.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Проект выполняется при поддержке Минобрнауки России, «Исследование статистических закономерностей ледовых нагрузок на инженерные сооружения и разработка нового метода их вероятностного моделирования (FSEG-2020-0021)»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шаратов, Д.А. Термодинамическая модель ледового воротника в гидротехническом строительстве / Д.А. Шаратов, Ю.С. Ключков // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2023. – Т. 25. – № 3(113). – С. 107-113, <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113>.
2. Шаратов, Д.А. Устойчивость каменной наброски к подвижкам льда методом КЭ / Д.А. Шаратов, А.С. Сумцова // Гидротехническое строительство. – 2023. – Т. 2. – С. 2-7. – ISSN: 0016-9714, <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.13.50.001>.
3. DS/ISO 19906-2019 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. International Organization for Standardization, 2019.
4. Croasdale K. Ice loads on offshore structures // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1985. – Т. 107(4). – С. 401-407.
5. Tiku S., Benndorf J., Liikamaa K. Ice loads on structures – a review // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1986. – Т. 108(2). – С. 166-173.
6. Kusumoto K. Theoretical model for predicting ice loads on offshore structures // In Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'84). – 1984. – С. 357-372.
7. Beltaos S., Croasdale K. Observations on the characteristics of ice loads on structures // Cold Regions Science and Technology. – 1985. – Т. 11(3). – С. 225-235.

8. *Kareem A., Kwon O.* Advances in wind engineering: the effects of extreme wind events on structures // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2010. – T. 368(1919). – C. 3027-3044.
9. *Shi Y.* A numerical investigation of ice-structure interaction using a discrete element model // Ocean Engineering. – 2016. – T. 118. – C. 274-287.
10. *Papangelis L., Wang J., Yan J.* Measurement techniques for ice load monitoring on offshore structures: a review // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – T. 153. – C. 80-92.

HISTORY AND DEVELOPMENT OF ICE LOAD CALCULATION METHOD FOR HYDROTECHNICAL STRUCTURES

© 2023 D.A. Sharapov

St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great
(National Research University), St. Petersburg, Russia

The article considers the issues of the historical development of methods for assessing the ice load on hydrotechnical structures. The importance of calculating ice loads for the safety and reliability of offshore structures in cold climates is underlined. The article points to the existence of old empirical methods for calculating ice load and gives the current state of the art in this field. The development of international standards and guidelines for ice load assessment is cited as an example of the development of this area of expertise. The empirical methods used to estimate ice load prior to the development of modern standards are indicated, and their limitations and dependence on empirical data are emphasized. The use of modern numerical methods, including the discrete element method (DEM), which provides more accurate and reliable estimates of ice loads on offshore structures, seems to be a significant step forward in the assessment of these loads. The article mentions the advantages of DEM over traditional methods and also discusses modern software packages that can be used for discrete modeling of ice loads on offshore structures, including commercial and open source options. In conclusion, the need for continuous improvement of calculation methods is emphasized, as this directly affects not only the cost, but also the reliability and safety of offshore marine hydrotechnical structures.

Keywords: ice load, hydrotechnical structure, calculation method, numerical method, ISO 19906, DEM.

DOI: 10.37313/1990-5378-2023-25-6-92-97

EDN: BKVZIB

REFERENCES

1. *Sharapov, D.A.* Termodinamicheskaya model' ledovogo vorotnika v gidrotekhnicheskom stroitel'stve / D.A. Sharapov, Yu.S. Klochkov // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. – 2023. – T. 25. – № 3(113). – S. 107-113, <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2023-25-3-107-113>.
2. *Sharapov, D.A.* Ustojchivost' kamenoj nabroski k podvizhkom l'da metodom KE / D.A. Sharapov, A.S. Sumcova // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo. – 2023. – T. 2. – C. 2-7. – ISSN: 0016-9714, <http://dx.doi.org/10.34831/EP.2023.13.50.001>.
3. DS/ISO 19906-2019 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures. International Organization for Standardization, 2019.
4. *Croasdale K.* Ice loads on offshore structures // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1985. – T. 107(4). – C. 401-407.
5. *Tiku S., Benndorf J., Liikamaa K.* Ice loads on structures – a review // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. – 1986. – T. 108(2). – C. 166-173.
6. *Kusumoto K.* Theoretical model for predicting ice loads on offshore structures // In Proceedings of the 7th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC'84). – 1984. – C. 357-372.
7. *Beltaos S., Croasdale K.* Observations on the characteristics of ice loads on structures // Cold Regions Science and Technology. – 1985. – T. 11(3). – C. 225-235.
8. *Kareem A., Kwon O.* Advances in wind engineering: the effects of extreme wind events on structures // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. – 2010. – T. 368(1919). – C. 3027-3044.
9. *Shi Y.* A numerical investigation of ice-structure interaction using a discrete element model // Ocean Engineering. – 2016. – T. 118. – C. 274-287.
10. *Papangelis L., Wang J., Yan J.* Measurement techniques for ice load monitoring on offshore structures: a review // Cold Regions Science and Technology. – 2018. – T. 153. – C. 80-92.

*Dmitry Sharapov, PhD, Associate Professor of the Higher School of Hydrotechnical and Energy Construction.
E-mail: sharapov.dm@gmail.com*