ВЕСТНИК
ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
МОРСКОГО И РЕЧНОГО ФЛОТА ИМЕНИ АДМИРАЛА С. О. МАКАРОВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-819-831

CONCEPTUAL MODELING THE SYSTEM FOR ENSURING DESIGN RELIABILITY OF THE OFFSHORE ICE-RESISTANT HYDRAULIC STRUCTURES BASES

V. G. Tsuprik

Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

The phenomenon of vibration is considered in the paper. A serious threat to the safety of stationary marine structures operating in conditions of ice fields drift, is the vibration that occurs during cutting of the ice cover by the supports of structures. The process of interaction, as an object of research, is described by the force of resistance to a change in equilibrium in the formed natural-man-made "ice field — structure" system, simultaneously affecting both the edge of the ice field and the base of the structure, and growing to a certain maximum, then "dumped" to a certain minimum. The moment of the beginning of ice destruction is due to the achievement of the critical density of elastic energy accumulated in the compressed local volume of ice in the contact zone, which is the trigger of ice load phenomenon release on the structure and the beginning of its return to the equilibrium state, i. e. is the source of its oscillations. Such cyclic destruction of ice, as the main subprocess in the complex process of interaction between the ice field and the structure, must be viewed as a subject of research, since this phenomenon reflects the real mechanism of transforming the kinetic energy of the ice field movement into the potential specific energy of the newly formed surfaces of the destroyed fragments of ice. As a methodological basis and a tool of scientific research, the system analysis is used in the work as a method of setting and solving the problem through the decomposition of the process under study, analysis of its constituent phenomena and synthesis of an adequate model of cyclic ice destruction to study unsolved problems in calculating the loads of ice fields on offshore free-standing structures. The characteristics of the cyclic process of ice destruction, both the values of ice load peaks and their frequency are the initial parameters when performing a dynamic calculation of the structure to determine its reliability level. Obtaining these characteristics is possible only when using the energy criterion of ice destruction, the type and location in the design system of which are defined in the work.

Keywords: marine hydraulic structures, vibration, sea ice, ice destruction, cyclic load, system approach, specific energy of destruction.

For citation:
Tsuprik, Vladimir G. "Conceptual modeling the system for ensuring design reliability of the offshore ice-resistant hydraulic structures bases." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 13.6 (2021): 819–831. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-819-831.

УДК 627.01; 627.034; 001.89

КОНЦЕПТУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРОЕКТНОЙ НАДЕЖНОСТИ ОСНОВАНИЙ МОРСКИХ ЛЕДОСТОЙКИХ СООРУЖЕНИЙ

В. Г. Цуприк

ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»

В статье выполнен анализ причин вибрации, возникающей в процессе прорезания ледового покрова опорами сооружений, которая представляет серьезную угрозу для безопасности стационарных морских объектов, работающих в условиях дрейфа льдов. Процесс взаимодействия как объект исследования описывается силой сопротивления изменению равновесия в сформировавшейся природно-техногенной системе «ледовое поле — сооружение», одновременно контактно воздействующей и на кромку ледового поля, и на основание сооружения и нарастающей до определенного максимума, затем «сбрасываемой» до некоторого минимума. В результате декомпозиции системы и ее структурно-функционального анлиза в работе показано, что момент начала разрушения льда обусловлен достижением критической плотности упругой энергии, накопленной в сжатом локальном объеме льда в зоне контакта, что является триггером

явления сброса ледовой нагрузки на сооружение и началом его движения к точке равновесия, т. е. источником его колебаний. Такое циклическое разрушение льда, как основной субпроцесс в сложном процессе взаимодействия ледового поля и сооружения, является предметом исследования, поскольку именно это явление отражает реальный механизм превращения кинетической энергии движения ледового поля в потенциальную удельную энергию вновь образуемых поверхностей разрушенных фрагментов льда. В качестве методологической основы и инструмента научного исследования в работе использован системный анализ как метод постановки и решения проблемы через декомпозицию исследуемого процесса, анализ составляющих его явлений и синтез адекватной модели циклического разрушения льда для изучения нерешенных проблем в расчетах нагрузок ледовых полей на морские отдельно стоящие сооружения. Характеристики циклического процесса разрушения льда, такие как значения пиков ледовой нагрузки и их частота, являются исходными параметрами при выполнении динамического расчета сооружения для определения уровня его надежности. Получение этих характеристик возможно только при использовании энергетического критерия разрушения льда, тип и место в системе проектирования которого определены в работе.

Ключевые слова: морские гидротехнические сооружения, вибрация, морской лед, разрушение льда, циклическая нагрузка, системный подход, энергия разрушения.

Для цитирования:
Цуприк В. Г. Концептуальное моделирование системы обеспечения проектной надежности оснований морских ледостойких сооружений / В. Г. Цуприк // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2021. — Т. 13. — № 6. — С. 819–831. DOI: 10.21821/2309-5180-2021-13-6-819-831.

Введение (Introdution)

К морским гидротехническим сооружениям, возводимым на замерзающих акваториях и воспринимающим нагрузки от дрейфующих ледовых образований, относятся основания маяков, навигационных знаков, швартовных и отгрузочных палов, буровых платформ и др. Исходя из потребности возведения искусственного сооружения на морском шельфе в высоких широтах, главным проектным свойством такого сооружения является его ледостойкость. Такие сооружения, как морские ледостойкие основания (МЛО) буровых платформ, например, служат уникальными инженерными объектами, характерными особенностями которых являются уникально высокие стоимость, материалоемкость и трудоемкость их возведения. С учетом мирового опыта проектирования и возведения сооружений такого класса очевидно, что МЛО должны надежно функционировать в тяжелых условиях эксплуатации, разрушая ледовое поле (ЛП), дрейфующее под действием течений и ветра и обладающее огромной кинетической энергией, без нарушения его локальной прочности и общей устойчивости. «Ледостойкость» таких сооружений может быть достигнута созданием уникальных стационарных конструкций, обладающих достаточной жесткостью и устойчивостью для обеспечения явления «прорезания» ЛП в месте контакта его кромки с поверхностями опорных элементов конструкции.

Практика эксплуатации стационарных морских объектов, работающих в условиях дрейфа льдов, доказала существенную угрозу их безопасности, которую представляет возникновение вибрации, возбуждаемой в процессе взаимодействия ледового покрова с сооружением ввиду *циклического разрушения льда на опорах сооружений*. Факты разрушений в течение 1961–1987 гг. пяти установленных в море маяков в виде стационарных сооружений на Балтике подверглись тщательному исследованию, результаты которого были опубликованы и обсуждались в сообществе специалистов по механике льда (краткий обзор работ приведен в работе [1]). В Бохайском заливе Желтого моря две платформы были разрушены от вибрации [2], [3], вызванной перепадами сил при разрушении льда на опорах этих решетчатых конструкций. В 1978 г. на шельфе Азовского моря от натиска льда строящееся железобетонное основание буровой платформы в виде многогранника диаметром 8 м получило недопустимый крен из-за перераспределения нагрузки по грунту [4]. В море Боффорта зимой 1985–1986 гг. возникла реальная угроза потери устойчивости мощного гравитационного основания платформы «Моликпак» массой 54 тыс. т при сечении кессона 111 × 111 м^2 [5], [6]. Во всех случаях было установлено, что причиной возникновения значительных и опасных для со-

оружений, персонала и промыслового оборудования амплитуд колебаний, обусловивших опасное состояние эксплуатируемых платформ, является вибрация конструкций сооружений, вызванная относительно длительным циклическим разрушением льда на поверхности их оснований, что не было учтено в проектах этих и всех других отдельно стоящих морских сооружений, возведенных вплоть до начала XXI в. Данная проблема может быть решена после разработки и учета в нормативной методологии расчетов надежности МЛО параметров цикличности контактного разрушения льда.

Впервые рассмотрение совокупности «ледовое поле — сооружение» как единой «системы», в которой возникают колебания, генерируемые процессом разрушения льда, было предложено в 1970 г. K. A. Blenkarn. В дальнейшем эту идею поддержали другие исследователи, попытавшиеся обосновать возможность возникновения автоколебаний и резонанса в данной системе со ссылками на теорию колебаний. Для изучения процесса разрушения льда и связанного с ним возникновения вибрации сооружений были проведены многочисленные исследования с моделями в ледовых бассейнах [7]–[10]. Результаты этих исследований показали, что в диапазоне скоростей ЛП до некоторой предельной скорости ледовые нагрузки в системе «ЛП – МЛО» имеют *пилообразный характер* с частотой разрушения, пропорциональной скорости ЛП. Как только скорость ЛП превышает этот нижний предел, частота индуцированной разрушением льда вибрации модели сооружения (*IIV–Ice Induce Vibration*) имеет тенденцию фиксироваться на частоте, близкой к собственной частоте модели, что в реальном исполнении в природе может привести к выходу сооружения из строя, экологическим проблемам и даже к человеческим жертвам.

Наличие циклически изменяющейся ледовой нагрузки, в соответствии с действующим российским стандартом[1], требует выполнения динамических расчетов МЛО. В качестве исходных данных для таких расчетов необходимо использовать два основных параметра цикличности горизонтальной нагрузки на сооружение от льда: пиковое значение контактной силы и частоту (период) появления пиков. В настоящее время методики определения этих параметров не существует, поскольку отсутствует инструментальная запись процесса воздействия глобальной силы давления льда на реальное сооружение. Однако имеются записи — цифровые ряды изменения локальных контактных давлений льда на отдельные участки поверхностей опорных конструкций реальных сооружений, что позволяет определить частоту разрушения льда [5], [6], [11], [12], однако такие единичные и уникальные измерения не всегда воможно распространить на другие объекты, проектируемые для иных условий.

Несмотря на значительный прогресс в механике льда и физическом и численном моделировании динамического взаимодействия ледового поля с сооружением существующие значительные неопределенности в математическом описании данного явления не получили адекватного разрешения [1]. Это подтверждается действующими российскими и международными нормами[2, 3], в которых *метод определения предела прочности льда* существует как самостоятельная процедура, а результаты испытаний образцов «вставляются» в достаточнго абстрактные формулы — модели определения ледовой нагрузки, не являющиеся корректным описанием процесса взаимодействия ЛП и МЛО. В проектной практике сегодня не допускается создание «надежного» объекта без заложенных в его проект решений, обеспечивающих безопасность его функционирования в течение всего проектного периода эксплуатации. Очевидно, что как к проектированию, так и к строительству таких уникальных гидротехнических сооружений должны предъявляться самые жесткие требования относительно их надежности. Однако до настоящего времени нет нормативного метода, регламентирующего выполнение необходимых расчетов для гарантирования проектной надежности таких сооружений. Поэтому весьма актуальным является совершенствование расчетов надежности

[1] ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

[2] СП 38.13330.2018. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М.: Стандартинформ, 2019. 102 с.

[3] ISO/FDIS 19906. Petroleum and natural gas industries: Arctic offshore structures: ISO 19906: 2019. International Organization for Standardization (Draft), 2019. 546 p.

в методологии их проектирования путем разработки новых или дополнения соответствующих нормативных документов [13].

Конечной практической целью, для достижения которой выполняется данная работа, является *надежный расчетный метод определения прочности и устойчивости МЛО.* Для этого необходимо разработать концептуальную модель функционирования системы «ЛП – МЛО», которая должна служить базой для разработки метода, обеспечивающего расчет параметров стабильного состояния системы «ЛП – МЛО», работающей в сложной совокупности многих природных систем [14], [15]. Методологическими задачами для достижения данной цели получения нормативного метода определения ледовой нагрузки на такое сооружение служат задачи, являющиеся неотъемлемыми элементами системы его проектирования [13], которая должна адекватно сочетать *метод расчета,* описывающий *механизм разрушения льда* ЛП с МЛО с соответствующим ему *критерием разрушения*, равно как и с *методом определения* этого критерия как физической величины. Поэтому механизм разрушения льда здесь является *объектом исследования*, а критерий разрушения льда — *предметом исследования.*

Методы и материалы (Methods and Materials)

Системный подход к исследованию процесса взаимодействия ЛП с МЛО. Во всех методиках расчетов ледовой нагрузки на МЛО, рассматриваемых в рамках исследуеой проблемы, проектировщики МЛО всегда исходят из того, что надежность таких сооружений может быть достигнута созданием стационарных уникальных конструкций, обладающих высокими жесткостью, устойчивостью и обеспечивающих за счет этого «прорезание» льда в месте контакта кромки ЛП с опорными элементами МЛО. Эта позиция базируется на опыте проектирования уже возведенных и относительно стабильно функционирующих сооружений на шельфах ледовитых морей, которые были спроектированы с применением существующей *концепции непрерывного разрушения льда,* постулирующей *постоянство расчетного значения* контактной силы принятого для кинетических и кинематических параметров «расчетного ЛП». Однако для описания явления *циклического разрушения льда*, т. е. *«пилообразного» характера ледовой нагрузки* при прорезании опорами сооружений ледовых полей как *механического процесса*, необходимо вводить параметр «время» как естественную шкалу регистрации последовательности наступления описываемых элементов процесса, таких как фазы роста и сброса контактных сил, нарастание контактных давлений, моменты начала образования трещин или начала обратного движения опоры и др. Необходимость описания процесса механического разрушения льда во времени с учетом работы сил контактного давления, упруго деформирующих локальный объем массива льда в торцевой грани ледового поля предполагает использование *энергетической концепции* разрушения льда [16].

Характерным является то, что до настоящего времени не существует расчетной нормативной модели процесса *формирования ледовой нагрузки во времени*, адекватно учитывающей все аспекты процесса взаимодействия сооружения с кромкой ледового поля, поскольку этот процесс системно не анализировался. Не рассматривались и не описывались элементы системы, ее цель и системообразующая функция, баланс энергии ледового поля и сооружения в процессе их взаимодействия, работа контактного разрушение льда, отклонения сооружения и др. И, как отмечалось ранее, в методе определения предела прочности льда испытаниями малых образцов не регламентировано математическое описание процесса его разрушения, а лишь фиксируется значение предела его временной прочности.

Необходимость исследования динамического процесса взаимодействия ЛП с МЛО для разработки концептуальной модели обеспечения проектной надежности МЛО обуславливает применение системного подхода как *методологии проектирования*. Для анализа существующей методики расчета ледовой нагрузки на сооружения и разработки новой использован *системный анализ* [17] в качестве *методологической основы и инструмента* феноменологического, конструктивного и функционального анализа взаимодействия совокупности объектов «Ледовое поле» и «Морское ледостойкое основание», поскольку ранее было определено, что данная совокупность является *системой*.

Результаты применения системного анализа позволят установить взаимосвязи и взаимное соответствие всех моделей, методов и расчетных величин как *параметров выхода* системы «ЛП – МЛО». Основой для синтеза — построения новой методологии расчета ледовой нагрузки — должны послужить результаты решения трех основных задач при исследовании рассматриваемой системы «ЛП – МЛО»:

– декомпозиции системы (цели, структура, функции, факторы и неопределенности);
– структурного, функционального и конструктивного анализа системы;
– структурного и параметрического синтеза новой модели системы.

Дескриптивное определение совокупности объектов «ЛП – МЛО» как системы. Рассмотрим реально существующую совокупность объектов «ЛП – МЛО» на предмет ее соответствия всем определениям системы (рис. 1). Это необходимо для удостоверения правомерности ее исследования в качестве системы методами системного анализа с целью решения рассматриваемой проблемы расчетов параметров цикличности ледовых нагрузок на морские отдельно стоящие сооружения путем синтеза адекватной модели циклического разрушения льда.

В настоящее время реально существуют и эксплуатируются ледостойкие основания маяков на Балтике, платформ ферменного типа в Бохайском заливе, несколько морских ледостойких оснований, работающих в тяжелых ледовых условиях на шельфах РФ (платформы Приразломная, Беркут, Орлан и др.). На основании данных многочисленных исследований [2], [3], [5]–[8] установлено, что рассматриваемое здесь явление взаимодействия совокупности элементов ЛП и МЛО (см. рис. 1) образует единое целое, элементы которого связаны двояко-едиными физико-механическими процессами *циклического разрушения льда* (объект — ЛП), формирующими процесс *колебаний ледостойкого сооружения* (объект МЛО), являющихся эмерджентными (интегративными) свойствами этой совокупности, не присущими составляющим ее объектам. Следовательно, совокупность ЛП с МЛО *является системой.* Покажем это декомпозицией ее структуры, функций и комплексным анализом ее целей и свойств.

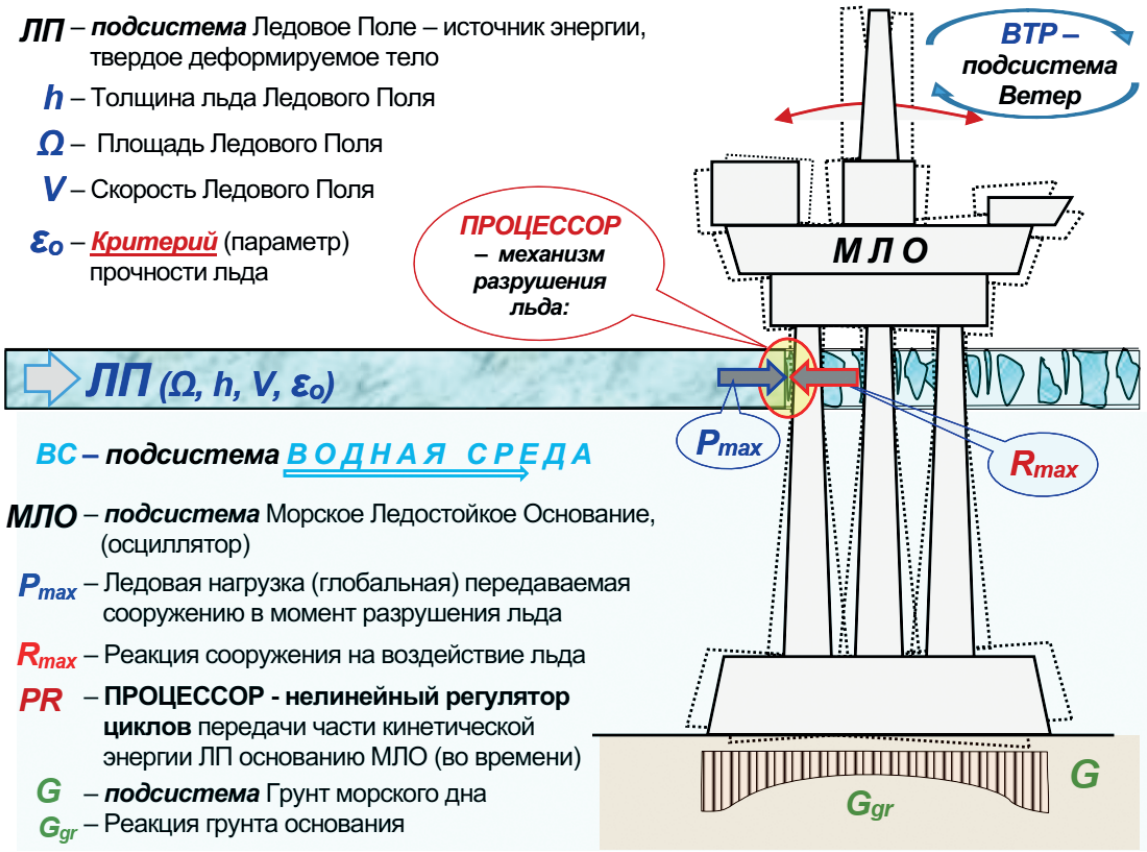

Рис. 1. Представление совокупности объектов «ЛП – МЛО» как системы во внешней среде

Как и всякая другая разрабатываемая для решения обозначенной проблемы система, «ЛП – МЛО» должна иметь конкретную цель. В данном случае цель системы не может быть «внутренней», обеспечивающей ее самофункционирование, она задается, например, разработчиком проекта морского ледостойкого основания буровой платформы. Проектировщика интересует решение вопросов по обеспечению стабильного проектного состояния системы «ЛП – МЛО», которая должна надежно и бесперебойно работать в ледовых условиях. Поэтому *цель рассматриваемой системы* как желаемое проектное ее состояние, задается целью проекта: придать сооружению *свойство ледостойкости*. Важно, что непротиворечивость целей основных элементов системы «ЛП – МЛО» подтверждает, что их совокупность действительно можно считать системой: цель ЛП — движение; цель МЛО — устойчивое положение на грунте под действием гравитации. Главное условие достижения системой ее цели — она должна находиться в «*области достижимости*», т. е. проектная жесткость сооружения всегда должна превышать жесткость ледового поля (льда): условно $R_{max} > P_{max}$.

Феноменологически цель системы «ЛП – МЛО» описывается следующим образом: *обеспечить непрерывное разрушение льда в течение всего времени воздействия дрейфующих ледовых полей на опоры основания сооружения*. Значит, рассматриваемая упорядоченная совокупность элементов «ЛП – МЛО», обладающая свойством ледостойкости МЛО с учетом принципа интегративности [14], [15], может и должна рассматриваться как система, характеризующаяся не только направленным, но и полезным эффектом, а именно удовлетворением исходной потребности устойчивого состояния МЛО — прорезанием дрейфующих ледовых полей.

Результаты исследований (Research Result)

Структурно-функциональный анализ системы «ЛП – МЛО». Структурный анализ рассматриваемой совокупности элементов, выполненный согласно основным положениям системного подхода [14], [15], показывает, что она состоит из нескольких элементов (*подсистем*), взаимодействующих между собой (см. рис. 1). Одним из таких элементов является *ЛП*, имеющее плавучесть и перемещающееся в горизонтальном направлении под действием другого элемента — *внешней среды* (таких ее составляющих, как ветер и течение). Другими элементами являются: рассматриваемое сооружение (*МЛО*), *водная среда*, в которой сооружение расположено, и *грунтовое основание* (*G*), составляющее базу для установки сооружения на дно.

Функционирование рассматриваемой сложной совокупности элементов обеспечивается реализацией связей между ними: между ледяным полем и опорами сооружения, между опорами сооружения или его опорной плитой и грунтом основания, между сооружением и водной средой. При этом каждый из элементов в рассматриваемой совокупности обладает присущими только ему и только в определенный конкретный отрезок времени феноменологическими свойствами, обусловливающими уникальность протекающих в них процессов в период их взаимодействия.

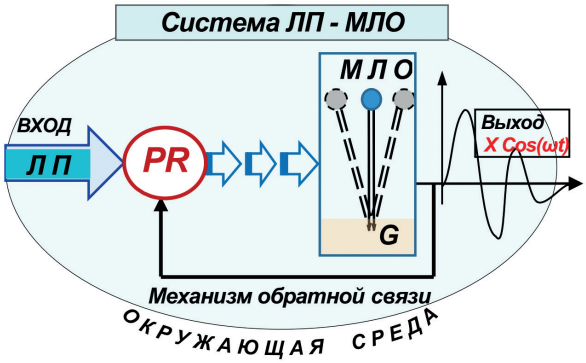

Рис. 2. Схематичное изображение системы «ЛП – МЛО»

Функциональная модель принципа действия основных элементов системы «ЛП – МЛО» приведена на рис. 2. Функционирование системы происходит в виде работы процессора (*PR*) в качестве преобразователя кинетической энергии движущегося ЛП в другие виды энергии: поверхностную энергию блоков, обломков, крошки разрушенного льда в массиве ледового покрова в объеме образующейся прорези ледового поля, а также в упругую энергию отклонения МЛО.

В зависимости от ряда кинематических, кинетических, геометрических, физико-механических параметров ледового поля и льда, а также геометрических размеров сооружения и его жесткости, регулирующих характер процесса взаимо-

действия, вид выходного сигнала, а именно: среднее значение контактной силы, амплитуды ее пиков и их частота будут различными — от сравнительно постоянных значений без заметных колебаний, до пилообразной кривой с одинаковыми или изменяющимися амплитудами и частотами.

Функционирование единого процесса взаимодействия ЛП с МЛО состоит в одновременном развитии двух ее основных эмерджентных свойств — субпроцессов первого уровня: деформирования локального объема льда в торцевой грани ледового поля и упругого отклонения сооружения от положения равновесия. Между началом процесса взаимодействия ледового поля с сооружением и его окончанием в рассматриваемой природно-техногенной системе эти два свойства проявляются в виде циклически повторяющихся субпроцессов второго уровня. Первым из них является субпроцесс разрушения льда, вторым — субпроцесс вынужденных колебаний сооружения, частота которых регулируется частотой разрушения льда.

Феноменологической особенностью процесса воздействия льда на поверхность опоры сооружения является совершение работы по сжатию локального объема льда контактной силой одновременно с равной ей работой упругого отклонения сооружения от положения равновесия. При этом контактная сила нарастает до определенного максимума, затем «сбрасывается» до некоторого минимума в момент начала разрушения льда. Процесс механического разрушения льда рассматривается здесь в качестве *объекта исследования*. Циклическое разрушение льда как основной субпроцесс в процессе взаимодействия ледового поля и сооружения отражает реальный механизм превращения кинетической энергии движения ледового поля в потенциальную удельную энергию вновь образуемых поверхностей разрушенных фрагментов льда.

Работе контактной силы по сжатию локального объема льда противодействует жесткость структуры льда (рис. 3). В каждую единицу времени в сжимаемом массиве льда растет плотность упругой энергии и при достижении ее критического значения в сжатом локальном объеме льда в зоне контакта произойдет его разрушение, что вызовет сброс ледовой нагрузки на сооружение и начнется его движение обратно к точке равновесия. Поскольку движение ЛП продолжается, процесс взаимодействия ЛП с МЛО в виде циклов «нагрузка – сброс» (отклонение МЛО — возврат) повторяется до прорезания сооружением всего ледового поля. Таким образом, циклы нарастания – сброса нагрузки являются источником колебаний сооружения. Частота субпроцесса вынужденных колебаний сооружения, таким образом, регулируется частотой разрушения льда. Триггером начала разрушения льда в каждом цикле является критерий разрушения льда, который служит *предметом данного исследования*.

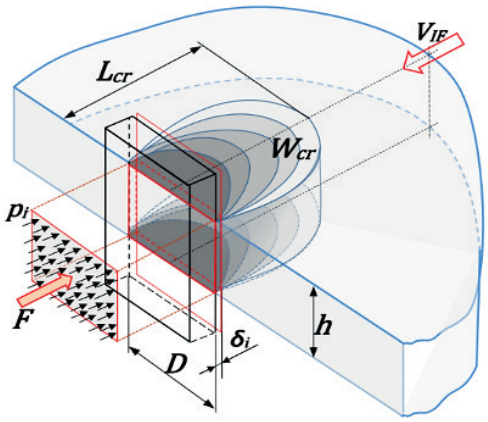

Рис. 3. Основные параметры взаимодействия ЛП с МЛО

Результаты функционального анализа системного взаимодействия ЛП с МЛО показывают, что разрушение льда происходит *послойно* на определенную глубину L_{cr} в каждом цикле его нагружения (рис. 3), прерываемого разрушением слоя при достижении в нем критического напряженно-деформированного состояния.

Конструктивное определение системы «ЛП – МЛО». Учитывая полученный вывод о том, что совокупность «ЛП – МЛО» в целях анализа ее совместного функционирования может исследоваться как система. Понятие «надежность проекта МЛО» должно быть рассмотрено с учетом не только *феноменологических* (назначение, цель существования, целевая функция), но и *конструктивных* особенностей (строение, состав, устройство) системы «ЛП – МЛО». Как всякая техническая система [15], [17], система «ЛП – МЛО» может быть конструктивно определена как единство входа, выхода и процессора (PR) — см. рис. 2, предназначенных для упорядоченной реализации определенной функции по достижению *цели системы* — сохранению или изменению ее основного

свойства. Ранее было показано, что основными интегративными свойствами системы является *разрушение льда* на контакте кромки ледового поля с поверхностью с одной из опор МЛО и *колебания сооружения* (упругие знакопеременное деформирование его конструкции) при передаче ей части энергии движущегося ледового поля в виде периодически повторяющихся пиков ледовой нагрузки в промежутках времени между моментами разрушения льда.

Входом системы является ее элемент ЛП, функцией которого служит восприятие воздействия внешней среды. К конструктивным особенностям ледяного поля следует отнести его плоскую форму, скорость V, размеры в плане Ω, толщину h и прочность льда ε_0 (см. рис. 1). Под входным воздействием среды в данном случае приняты следующие вещественные компоненты: скорость ветра $V_в$ и течения $V_т$, сообщающие движение ледяному полю со скоростью V; воздействие воды, обеспечивающей плавучесть и выполняющей гашение скорости ледяного поля; температура воздуха T, °С, под воздействием которой охлаждается вода и образуется ледяной покров той или иной толщины и набирает определенную прочность лед.

Выходом системы являются те элементы морского ледостойкого основания или их части, которые передают ее выходные воздействия в окружающую среду. Выходными воздействиями системы на среду в рассматриваемом случае являются обломки ледяных полей на поверхности моря, колебания всей конструкции МЛО, упругие волны, возникающие в воздушной и водной среде при колебаниях МЛО, изменения в распределении давления опорной плиты МЛО на грунтовое основание дна, шум, создаваемый разрушающимся льдом (см. рис. 1).

Основными выходными параметрами процесса преобразования энергии здесь являются значение *пикового контактного усилия* на поверхности опоры МЛО — $P_к$ и *период цикла разрушения льда* (период колебания МЛО) — $T_ц$.

В процессе функционирования системы входные воздействия преобразуются в выходные посредством *процессора* — средства, обеспечивающего такое преобразование [15]. В общем случае процессор представляется как единство трех составляющих: *оснащения, упорядоченности* и *катализатора.* Ответом на вопрос о месте расположения процессора является результат феноменологического анализа процесса преобразования энергии одного из элементов системы — движущегося ЛП, в энергию разрушения льда с помощью другого элемента системы — МЛО. Процессор должен и пространственно, и функционально находиться между ними (см. рис. 1 и 2).

Конструкция МЛО, его неизменные параметры, такие как высота опор, их форма, размеры и материал, из которого они изготовлены, масса сооружения, жесткость каркаса сооружения и ряд других параметров определяют характер (тип) разрушения льда. Эти параметры следует рассматривать в качестве элементов оснащения процессора, они для конкретного сооружения остаются постоянными в течение всего периода его службы. Таким образом, оснащение процессора обеспечивает функционирование данной системы: преобразование входных воздействий в выходные, т. е. разрушение льда. По определению, порядок разрушения льда по одному из видов (типов) разрушения — это механизм разрушения льда [7], [8], поскольку он зависит от параметров ЛП (его толщины и скорости, физико-механических свойств льда и распределения их по толщине и площади). Эти параметры также удовлетворяют определению оснащения процессора системы «ЛП – МЛО». Следовательно, процессором в системе «ЛП – МЛО» служит механизм разрушения льда, главной функцией которого является *реализация целевого свойства* системы разрушать структуру льда в строго определенном порядке в результате разрыва ее внутренних связей под действием напряжений, создаваемых в них внешним силовым воздействием. Данное свойство системы имеет место при воздействии ледовых полей на сооружения как с податливыми опорами, так и с широкими неподвижными сооружениями-стенками. При этом необходимо отметить, что для изменения скорости, интенсивности и качества преобразований энергии движущегося ледового поля в энергию разрушения льда отдельные параметры элементов оснащения процессора — его *катализаторы* — могут изменяться (при вариантном проектировании) или задаваться конкретно.

В качестве одного из катализаторов можно рассматривать форму опоры, в качестве других — количество опор и размер каждой из них. Например, разрушение льда у опоры конического типа будет происходить при достижении предельной стрелки прогиба ледового поля, наползающего на поверхность опоры. При опорах с острой режущей гранью возможно раскалывание льдины. Ледовое поле из тонкого льда, движущееся под напором ветрового потока, может потерять устойчивость при изгибе, «упершись» в широкую опору сооружения. Разрушение ледового поля также может происходить в виде разрушений местного характера («смятие» или скалывание верхней и нижней поверхности ледовой плиты) при контакте его кромки с опорной конструкцией сооружения.

Выполненные этапы системного анализа функционирования совокупности объектов «ЛП – МЛО» как сложной природно-технической системы позволяют сформулировать в качестве результатов ряд положений рассматриваемой проблемы.

1. Дрейфующее ЛП может обладать колоссальной кинетической энергией *U*ЛП, воспринимая своими нижней и верхней поверхностями воздействие сил морских течений, приливов–отливов и ветра. Функциональная модель принципа действия системы «ЛП – МЛО» представленная на рис. 2, демонстрирует процесс преобразования массива льда (ЛП как материальной основы системы) в его обломки и колебания МЛО «через механизм разрушения льда» (*PR*) посредством затрат кинетической энергии ЛП для достижения цели системы — ее устойчивого состояния (ледостойкости). Естественно, что движение и взаимодействие всех элементов, составляющих явление разрушения льда, должно описываться законами механики, прежде всего законом сохранения энергии. В то же время феномен периодического высвобождения энергии упругих напряжений в массиве льда, накапливаемой им поочередно в локальных объемах — слоях в зоне контакта — не является материальной субстанцией. Это значит, что механизм разрушения льда не является элементом системы, это ее *главная функция*, не являющаяся функцией ни одного из ее элементов и отражающая основное предназначение системы: преобразование кинетической энергии ЛП в потенциальную энергию поверхностей обломков разрушенного льда.

2. Очевидно, что при неизменных параметрах некоторого конкретного процесса взаимодействия ЛП с МЛО непосредственно на процесс разрушения льда должна затрачиваться некоторая относительно постоянная часть кинетической энергии ЛП и он является процессом периодического преобразования части энергии движущегося ЛП в энергию периодического разрушения льда и энергию вынужденного периодического упругого отклонения сооружения, что обусловлено движением ледового поля и циклическим разрушением льда на контакте кромки ЛП с поверхностью МЛО. Следовательно, в законе функционирования процесса механического разрушения льда основным его элементом, контролирующим дозирование диссипации энергии в течение каждого цикла колебания МЛО в системе «ЛП – МЛО», является предельное значение *критерия разрушения льда.* Исследования именно этой физической величины дают возможность *экспериментального определения* расчетных *пиковых значений* контактной силы и *частоты* появления таких пиков — исходных параметров для динамического расчета сооружения.

3. В каждом конкретном случае взаимодействия ЛП и МЛО эта энергия преобразуется в поверхностную энергию материальных элементов (осколки и блоки, крошка смятого льда, трещины различной природы и т. д.), и затрачивается на работу в процессах появления, развития, перемещения и удаления из зоны контакта этих физических тел во времени. Учитывая это, можно констатировать, что результат расчета срока службы ледостойкого сооружения с определенной вероятностью обеспечения его надежности будет обусловлен в основном адекватностью математического описания процесса разрушения льда при его контакте с поверхностью опоры сооружения, как и его *соответствием выбранной гипотезе механики разрушения льда*, а также надежностью физического определения расчетного параметра прочности льда, т. е. *адекватностью применяемых средств и методов определения критерия прочности льда*. Место «процессора» — механизма разрушения льда с критерием разрушения в системе проектирования МЛО и его роль в определении ледовой нагрузки на МЛО показаны на рис. 4.

Рис. 4. Схема элементов методологии обеспечения надежности и долговечности проектируемого морского ледостойкого основания

Обсуждение результатов (Discussion of Results)

Выполненный анализ дает возможность проведения дальнейших исследований по созданию новой методологии ледовой нагрузки на шельфовые сооружения, которые должны быть направлены на разработку новой модели, адекватно описывающей *работу силы, совершающей разрушение льда* на контакте ЛП с МЛО эквивалентными этой работе затратами энергии. Внешними материализованными проявлениями механизма разрушения льда являются трещины нормального отрыва или сдвига, которые зарождаются и развиваются, поглощая упругую энергию сжатого массива льда, превращающую его в массу мелкодисперсных обломков льда, образовавшихся в результате «смятия» относительно крупных блоков и обломков. Поэтому процессор системы «ЛП – МЛО» — механизм хрупкого разрушения льда в массиве — играет определяющую роль в процессе расчета ледовой нагрузки на МЛО. При проектировании сооружения важно рассмотреть все возможные модели взаимодействия и, следовательно, *критерии разрушения льда*, выбрав ту модель механизма разрушения и критерий разрушения льда, которые соответствуют именно этой модели, адекватно отображают процесс разрушения льда и дадут наибольшее значение ледовой нагрузки, которую следует принять за расчетную, но при этом данное значение будет включать нормированные показатели надежности принятого решения (см. рис. 4).

В результате проведения натурных и лабораторных исследований процессов разрушения льда на контакте с опорой сооружения [5]–[10], [11], [12] и в ходе теоретических изысканий достоверно установлено, что рассмотренные феноменологические особенности поведения ЛП и льда, из которого оно состоит, а также поведения конструкции МЛО показывают, что в природе преобразования энергии ЛП в энергию разрушенной массы (объема) массива льда проявляются в виде различных природно-техногенных алгоритмов (типов или моделей). Эти алгоритмы (далее — модели), описывают процесс прорезания ЛП опорами МЛО как через *механизмы непрерывного разрушения* и выдавливания разрушенной массы льда из зоны перед поверхностью опоры, так и через *механизмы «циклического разрушения»* льда, происходящего в результате разгрузки накопленной в контактной зоне льда потенциальной упругой энергии его деформирования. При этом во всех таких моделях преобразования энергии всегда существует механизм «*сбрасывания*» накопленной до критического значения упругой энергии U^*_{cr} для конкретного деформируемого объема льда в результате преобразования части энергии ледового поля $U_{ЛП}$ через механизм одновременного нагружения контактной силой F, льда и МЛО для его отклонения от положения равновесия на некоторую величину.

Таким образом, существует реальная необходимость разработки использования новой в данной области *энергетической концепции определения неизвестных расчетных параметров* циклического разрушения льда в процессе взаимодействия ЛП с МЛО для их применения в процессе динамических расчетов ледовой нагрузки на сооружение. К ним относятся такие характеристики циклического процесса разрушения льда, как значения пиков ледовой нагрузки и их частота. Получение этих характеристик возможно только при использовании энергетического критерия разрушения льда, вид и место которого необходимо определить в отдельном исследовании.

Заключение (Conclusion)

Глобальный процесс воздействия льда на сооружение может быть описан законом сохранения энергии, который постулирует равенство объема энергии воздействия ЛП на МЛО в каждую единицу времени контакта и объема диссипации этой энергии в системе «ЛП – МЛО», т. е. количественные параметры процесса силового взаимодействия ЛП и МЛО в реальном времени, можно получить только при решении *уравнения энергетического баланса*. Для составления такого уравнения следует рассмотреть совместную работу ледового поля, обладающего запасом кинетической энергии и стационарного либо упруго-податливого сооружения. Это можно считать основным выводом из феноменологического конструктивного и функционального анализа проблемы расчета ледовой нагрузки для определения надежности морских ледостойких оснований, который учитывает особенности строения и физико-механических свойств льда, характер разрушения ледовых полей и массива льда при контакте с поверхностью опоры сооружения.

Исходя из требования обеспечения надежности проекта МЛО, та его часть, в которой выполняется строительное проектирование сооружения, должна быть обеспечена надежным методом расчета ледовой нагрузки, а следовательно, надежным методом определения критерия разрушения льда и полного соответствия основных физико-механических аспектов разрушения льда, используемых в расчетной модели, тем параметрам, которые определяют аналогию таких аспектов в методе определения критериальных значений прочностной характеристики льда. Поэтому основным расчетным параметром при определении ледовой нагрузки на МЛО является *критерий разрушения льда* ε_0. Поскольку метод расчета ледовой нагрузки на МЛО является частью методологии его проектирования, он должен гармонично сочетаться с методом подготовки исходных данных, соответствующих этим расчетам и, в первую очередь, с *критерием разрушения льда*. Очевидно, что от полноты соответствия метода разрушения льда при его испытаниях на прочность (метода определения критерия), т. е. от адекватности его природе разрушения массива льда в торцевой грани ЛП, зависит *уровень достоверности любой методологии проектирования МЛО.*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hossain R.* An assessment of sensitivity of the self-excited modelling approach for simulating dynamic ice-structure interactions to changes in temperature and scale effects / R. Hossain, R. Taylor, L. Moro // Ocean Engineering. — 2018. — Vol. 165. — Pp. 410–425. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.029.

2. *Hou J.* Structural Design for the Ice-Resistant Platform / J. Hou, W. Shao // The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. — OnePetro, 2014. — Pp. 1118–1124.

3. *Zhang D.* Risk analysis of jacket platforms under ice induced vibrations / D. Zhang, Q. Yue, B. Tong // 19th IAHR International Symposium on Ice Vancouver, British Columbia, Canada. — 2008. — Pp. 1277–1286.

4. *Ажермачев Г. А.* О воздействии льда на опоры морских платформ при его подвижке / Г. А. Ажермачев // Строительство и техногенная безопасность. — 2005. — № 12. — С. 6–9.

5. *Jordaan I.* Re-evaluation of ice loads and pressures measured in 1986 on the Molikpaq structure / I. Jordaan, J. Bruce, K. Hewitt, R. Frederking // POAC ‘11: Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. — Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2011. — № POAC11–130.

6. *Jordaan I.* Re-evaluation of ice loads on the Molikpaq structure measured during the 1985–86 season / I. Jordaan, K. Hewitt, R. Frederking // Canadian Journal of Civil Engineering. — 2018. — Vol. 45. — Is. 3. — Pp. 153–166. DOI: 10.1139/cjce-2016–0444.

7. *O'Rourke B. J.* Experimental Investigation of Oscillation of Loads in Ice High-Pressure Zones, Part 1: Single Indentor System / B.J. O'Rourke, I. J. Jordaan, R. S. Taylor, A. Gürtner // Cold Regions Science and Technology. — 2016. — Vol. 124. — Pp. 25–39. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.12.005.

8. *Abramian A. K.* On a simple oscillator problem describing ice-induced vibrations of an offshore structure / A. K. Abramian, S. A. Vakulenko, W.T. van Horssen // Nonlinear Dynamics. — 2019. — Vol. 98. — Is. 1. — Pp. 151–166. DOI: 10.1007/s11071-019-05179-z.

9. *Taylor R.* Fracture and damage during dynamic interactions between ice and compliant structures at laboratory scale / R. Taylor, T. Browne, I. Jordaan, A. Gürtner // ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. — American Society of Mechanical Engineers, 2013. — Vol. 6. — Paper No: OMAE2013–11070, V006T07A024. DOI: 10.1115/OMAE2013–11070.

10. *Hossain R. B.* Characterization of high pressure zone (hpz) failure and linkages with structural response during medium-scale indentation tests / R. B. Hossain, R. S. Taylor // Proceedings of the 25 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. — POAC, 2019.

11. *Nord T. S.* Ice force identification on the Nordströms-grund lighthouse / T. S. Nord, O. Øiseth, E. M. Lourens // Computers & Structures. — 2016. — Vol. 169. — Pp. 24–39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.02.016.

12. *Zhang D.* Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea / D. Zhang, G. Wang, Q. Yue // Cold Regions Science and Technology. — 2018. — Vol. 154. — Pp. 103–110. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.05.012.

13. *Цуприк В. Г.* Методологический подход к анализу содержания проблемы определения надежности морских ледостойких оснований / В. Г. Цуприк // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2014. — № S4–9. — С. 168–180.

14. *Анисимов О. С.* Методология: функция, сущность, становление (динамика и связь времен) / О. С. Анисимов. — М.: ЛМА, 1996. — 380 с.

15. *Карташев В. А.* Система ситем. Очерки общей теории и методологии / В. А. Карташев. — М.: «Прогресс-Акаемия», 1995. — 325 с.

16. *Цуприк В. Г.* Энергетическая концепция нормирования прочности льда для расчета ледовой нагрузки на вертикальные структуры / В. Г. Цуприк // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б. Е. Веденеева. — 2016. — Т. 279. — С. 85–105.

17. *Перегудов Ф. И.* Введение в системный анализ / Ф. И. Перегудов, Ф. П. Тарасенко. — М.: Высш. шк., 1989. — 320 с.

REFERENCES

1. Hossain, R., R. Taylor, and L. Moro. "An assessment of sensitivity of the self-excited modelling approach for simulating dynamic ice-structure interactions to changes in temperature and scale effects." *Ocean Engineering* 165 (2018): 410–425. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.07.029.

2. Hou, Jinlin, and Weidong Shao. "Structural design for the ice-resistant platform." *The Twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference*. OnePetro, 2014. 1118–1124.

3. Zhang, D., Q. Yue, and B. Tong. "Risk analysis of jacket platforms under ice induced vibrations". *19th IAHR International Symposium on Ice Vancouver, British Columbia, Canada*. 2008. 1277–1286.

4. Azhermachev, G. A. "O vozdeistvii l'da na opory morskikh platform pri ego podvizhke." *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'* 12 (2005): 6–9.

5. Jordaan Ian, Jonathon Bruce, Kevin Hewitt, and Robert Frederking. "Re-evaluation of ice loads and pressures measured in 1986 on the Molikpaq structure." *POAC '11: Proceedings of the 21st International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*. Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC), 2011. № POAC11–130.

6. Jordaan, Ian, Kevin Hewitt, and Robert Frederking. "Re-evaluation of ice loads on the Molikpaq structure measured during the 1985–86 season." *Canadian Journal of Civil Engineering* 45.3 (2018): 153–166. DOI: 10.1139/cjce-2016–0444.

7. O'Rourke, Brian J., Ian J. Jordaan, Rocky S. Taylor, and Arne Gürtner. "Experimental Investigation of Oscillation of Loads in Ice High-Pressure Zones, Part 1: Single Indentor System." *Cold Regions Science and Technology* 124 (2016): 25–39. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.12.005.

8. Abramian, Andrei K., Sergei A. Vakulenko, and Wim T. van Horssen. "On a simple oscillator problem describing ice-induced vibrations of an offshore structure." *Nonlinear Dynamics* 98.1 (2019): 151–166. DOI: 10.1007/s11071-019-05179-z.

9. Taylor, Rocky, Tom Browne, Ian Jordaan, and Arne Gürtner. "Fracture and damage during dynamic interactions between ice and compliant structures at laboratory scale." *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.* Vol. 6. American Society of Mechanical Engineers, 2013. DOI: 10.1115/OMAE2013–11070.

10. Hossain, Ridwan B., and Rocky S. Taylor. "Characterization of high pressure zone (hpz) failure and linkages with structural response during medium-scale indentation tests." *Proceedings of the 25 th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions.* 2019.

11. Nord, Torodd S., Ole Øiseth, and Eliz-Mari Lourens. "Ice force identification on the Norströmsgrund lighthouse." *Computers & Structures* 169 (2016): 24–39. DOI: 10.1016/j.compstruc.2016.02.016.

12. Zhang, Dayong, Guojun Wang, and Qianjin Yue. "Evaluation of ice-induced fatigue life for a vertical offshore structure in the Bohai Sea." *Cold Regions Science and Technology* 154 (2018): 103–110. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.05.012.

13. Tsupryk, V.G. "The methodological approach to the analysis of the problem of determining the reliability of marine iceresistant platforms." *Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)* S4–9 (2014): 168–180.

14. Anisimov, O. S. *Metodologiya: funktsiya, sushchnost', stanovlenie (dinamika i svyaz' vremen).* M.: «LMA», 1996.

15. Kartashev, V. A. *Sistema sitem. Ocherki obshchei teorii i metodologii*. M.: «Progress-Akaemiya», 1995.

16. Tsuprik, V. G. "Energy concept of ice strength normalization for calculation of ice load on vertical structures." *Izvestiya Vserossiiskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta gidrotekhniki im. B. E. Vedeneeva* 279 (2016): 85–105.

17. Peregudov, F. I., and F. P. Tarasenko. *Vvedenie v sistemnyi analiz*. M.: Vysshaya shkola, 1989.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ	INFORMATION ABOUT THE AUTHOR
Цуприк Владимир Григорьевич — кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет» 690091, Российская Федерация, г. Владивосток, ул. Суханова, 8 e-mail: *vg_tsuprik@mail.ru*	**Tsuprik, Vladimir G.** — PhD, associate professor Far Eastern Federal University 8 Sukhanova Str., Vladivostok, 690091, Russian Federation e-mail: *vg_tsuprik@mail.ru*

Статья поступила в редакцию 29 ноября 2021 г.
Received: November 29, 2021.