

Вероятностные аспекты оценки ледовых нагрузок и воздействий на объекты обустройства морских месторождений на примере айсберговой угрозы

Offshore Hazards: Assessing the Impact of Icebergs on Offshore Production Platforms

Часть 1 - Part 1

Д.А. Онищенко (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Dmitry A. Onishchenko (Gazprom VNIIGAZ LLC)

Введение

Проблема освоения нефтегазовых ресурсов континентального шельфа РФ, и в первую очередь, шельфа Арктики, требует проведения большого объема научных исследований фундаментального и прикладного характера. Одной из комплексных задач, имеющих большое практическое значение, является совершенствование методологии определения ледовых нагрузок на морские платформы, без использования которых освоение большинства месторождений, расположенных на арктическом шельфе России и в других морях с холодным климатом, пока представляется невозможным. Корректное решение вопроса о расчетных ледовых нагрузках определяет как технико-экономические показатели проекта обустройства шельфового месторождения, так и уровень надежности и безопасности, реализуемый при проектировании платформ: завышение нагрузок приводит к росту капитальных затрат на строительство, а занижение повышает риск повреждения и даже разрушения сооружения в процессе эксплуатации. Как и другие нагрузки, порождаемые природными факторами, ледовая нагрузка обладает высокой степенью статистической изменчивости. Поэтому задача определения расчетных значений ледовой нагрузки для различных расчетных ситуаций должна изучаться в рамках вероятностной

Introduction

Resolving the challenge of developing Russia's offshore oil and gas resources, those on Arctic shelf being first and foremost, requires much scientific research, both theoretical and practical. One of the main challenges is attempting to calculate the ice loads that can hit offshore platforms which is still critical for developing most fields in Russia's Arctic shelf. The correct estimation of the ice loads that are likely to be encountered is key – overestimation of the loads will result in higher capital expenditure, while underestimation will increase the risk of damage or even destruction during operation. As with other loads caused by natural factors, ice loads can vary enormously, and this is why calculating ice load values must be done within the probabilistic framework. One of the current challenges facing the industry is the construction of offshore platforms for a number of promising fields based in a number of Russia's northern seas, including the Barents and Kara Seas.

Using current data, the study proposes a physical and mathematical model which allows various iceberg hazard indicators to be analyzed. These include the probability of an iceberg/platform collision during a given timeframe, the probability distribution of the iceberg's kinetic energy on collision, etc.

Requirements are established for the initial data required for corresponding calculations. The paper discusses the results

постановки. Для нескольких северных морей России, включая Баренцево и Карское моря, на шельфе которых расположен целый ряд месторождений и перспективных структур с большими запасами углеводородов, одной из актуальных задач является реалистичная оценка айсберговой угрозы для морских платформ. В работе с учетом доступных в настоящее время данных фактических наблюдений предлагается полуаналитическая вероятностная физико-математическая модель, позволяющая оценивать различные показатели айсберговой угрозы, например, вероятности столкновения айсберга с платформой в течение заданного интервала времени, вероятностное распределение характеристик айсберга или его кинетической энергии при соударении с платформой и т. д. Сформулированы требования к исходным данным, которые необходимы для проведения соответствующих расчетов. Обсуждается вопрос о точности получаемых результатов и возможности использования их в практике проектирования.

1 Факторы, обуславливающие вероятностный характер ледовой нагрузки

Ледовая нагрузка на морские платформы возникает в процессе воздействия на них движущегося ледяного покрова, в общем случае, пространственно неоднородного, состоящего из ледяных образований различного типа (например, ровный лед, наслоненный лед, торосистый лед, айсберги и др. – с полным перечнем можно ознакомиться в Номенклатуре Всемирной метеорологической организации по льду [1]). При взаимодействии с преградой надвигающийся на нее лед разрушается под действием контактных сил со стороны платформы и, в свою очередь, по известному закону физики порождает аналогичные воздействия на корпус платформы. Таким образом, ледовая нагрузка на морскую платформу порождается процессами разрушения льда: локальными, имеющими место непосредственно в зоне контакта отдельных частей ледяного покрова с преградой, и глобальными, сопровождающими разрушение ледяного покрова или входящих в него отдельных ледяных образований в целом (в основном, это проявляется как трещинообразование). Заметим, при столкновении айсберга с платформой разрушение льда практически всегда будет иметь локальный характер.

Суммарная ледовая нагрузка на платформу в целом (ее часто называют глобальной нагрузкой) представляет собой некоторую функцию времени, демонстрирующую в общем случае очень высокую степень изменчивости. При этом характер изменения нагрузки во времени приводит к необходимости рассматривать ее как случайный процесс. Причина этого заключается в большом количестве параметров, одна группа которых определяет ледовый режим в районе установки

obtained and the possibility of their use in practical design work.

1 Factors behind the probabilistic nature of an ice load

The ice load on offshore platforms arise when the platform is affected by moving ice cover, generally of spatially inhomogeneous nature and consisting of various types of ice formations (e.g. level ice, rafted ice, ridged ice, icebergs etc) – the full list can be found in World meteorological organization's sea ice nomenclature [1]). Ice breaks as it advances and comes in contact with the platform and, in turn, creates pressure on the platform's hull. Therefore, the ice load on an offshore platform is governed by two separate destruction processes – local ones that take place during ice/platform contact, and the global processes which complement the destruction of the ice cover or its individual elements forming part of that cover on the whole (generally expressed as ice cracking). We should note that in almost all cases, an iceberg-to-platform collision will result in the local destruction of ice.

The total ice load on the entire platform (it is often referred to as global load) is a function of time which can, generally, vary significantly. Because of this variation, it is important to examine ice loads as random processes. There are a large number of parameters to take into account, including those that determine the ice regime in the area near the platform, while others do "manage" the interaction of ice cover with the platform.

Listed below are some of the parameters which determine the nature of an ice load. These parameters in particular determine the variability of the ice cover:

- » large number of ice formations (first year and multi-year level ice, ridges, icebergs etc);
- » thickness, morphometric composition, spatial boundaries of ice formations;
- » ice drifting at various velocities;
- » velocity and temperature during the contact with the structure;
- » frequency of certain ice formations shapes;

These parameters in particular determine the destruction of the ice cover:

- » local ice strength;
- » large number of destruction patterns (shearing, crushing, bending, stability loss, cracking, piling-up and etc.);
- » few interaction scenarios (impact, pile-up, freeze-up and etc.).

The above parameters are random values, based either on observations or mathematical modeling. For many of the listed parameters, however, the observation ranges are short, and may contain errors (as compared against "true" distributions which are apparently, unknown). Moreover, due to the internal heterogeneous properties of ice, its load, even for the same formation (e.g. level ice) with spatially invariable "external" parameters is of course random.

платформы, включая пространственную и временную изменчивость ледяного покрова, а вторая “управляет” взаимодействием различных ледяных образований с платформой.

Перечислим некоторые из параметров, обуславливающих вероятностный характер ледовой нагрузки. Изменчивость ледяного покрова характеризуется, в частности, такими параметрами:

- » большой набор ледяных образований (однолетний и многолетний ровный лед, торосы, айсберги и др.);
- » толщина, морфометрическое строение, пространственные размеры ледяных образований;
- » дрейф льда с различной скоростью;
- » скорость и температура в момент взаимодействия с сооружением;
- » частота появления определенных ледяных образований с различными геометрическими параметрами.

Разрушение ледяного покрова характеризуется, в частности, такими параметрами:

- » локальная прочность льда;
- » большое число механизмов разрушения (смятие, дробление, изгиб, потеря устойчивости, трещинообразование, нагромождение и др.);
- » несколько сценариев взаимодействия (удар, образование навала, смерзание и др.).

Все из указанных параметров должны трактоваться как случайные величины, задаваемые соответствующими вероятностными распределениями, которые могут быть определены либо на основе натурных наблюдений, либо с помощью физико-математического моделирования. Однако для многих из перечисленных параметров ряды наблюдений являются короткими и поэтому сами функции распределения задаются с неизбежными случайными ошибками (по отношению к “истинным” распределениям, которые, очевидно, неизвестны). Кроме того, вследствие внутренней неоднородности свойств льда случайный характер имеет зависимость нагрузки от времени даже для одного и того же ледяного образования (например, ровного льда), “внешние” параметры которого пространственно неизменны.

2 «Вероятностный» и «детерминистический» методы проектирования

Случайный характер ледовых нагрузок не представляет собой нечто уникальное – это свойство всех нагрузок, порождаемых природными факторами: волновой, ветровой, снеговой и т.д. Инженеры давно научились работать со случайными нагрузками – для целей проектирования применяются так называемые нормативные и расчетные значения нагрузок, также как и нормативные и расчетные значения прочности материала или грунта. Как известно, критерии

2 “Probabilistic” and “deterministic” design method

The random nature of ice loads is nothing new – it is normal for all loads caused by natural factors such as wind, wave, snow etc. Engineers have long mastered random loads: so called representative and design load values are used for design purposes along with representative and design values of the strength of structural material and soil. Design criteria for limit state methods are generally expressed as

$$Q_d \leq R_d, \quad (1)$$

where Q_d is a design value of the force factor such as force, bending moment, stress in a given element of the structure under design (or “action effect” using the new terminology [2], which is calculated for a given combination of applied loads;

R_d is a design value of bearing capacity for an element, usually calculated through strength properties of the soil or a material. (We should note that in regulatory documentation equations such as (1) are usually seen in modified form with additional multipliers. This doesn't affect subsequent analysis in any meaningful manner, thus for the purpose of simplicity we shall use this imprecise equation (1) for the design criteria.

In turn, design values are determined based on representative values Q_0, R_0 :

$$Q_d = \gamma_f Q_0, \quad R_d = R_0 / \gamma_m, \quad (2)$$

where γ_f and γ_m are so called partial safety factors (for load and for material, correspondingly).

We should note that all listed values are deterministic, thus for conventional design work, the random factor is effectively excluded: it only appears in the determination of representative (or, directly design) strength and load values. From now on, we only discuss action effects and corresponding loads. The representative value of ice load on the structure (which is random as we have stated) is generally accepted at a value with predetermined recurrence period T . Recurrence period values vary for different load types. Thus, present day regulatory norms [3], recommend $T = 100$ years for principal load combinations and $T \sim 10^3 \dots 10^4$ years for extraordinary combinations.

Thus, according to its definition, the representative load value expressed as q_α , is determined as a value that can be exceeded during a given (arbitrary chosen) year with a probability of $\alpha = 1/T$, which can be expressed in the following equation:

$$Pr\{Q > q_\alpha \text{ at least once a year}\} = \alpha, \quad (3)$$

where $Pr\{A\}$ stands for the probability of a random event A .

XI МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ И ВЫСТАВКА

ОСВОЕНИЕ ШЕЛЬФА РОССИИ И СНГ – 2014

23 мая 2014, Москва



5 ПРИЧИН ПОСЕТИТЬ КОНФЕРЕНЦИЮ

ПРИСОЕДИНЯЙТЕСЬ К ЛИДЕРАМ: ведущее мероприятие отрасли, ежегодно проходящее при поддержке компании «Газпром»

КЛЮЧЕВОЙ МОМЕНТ: открытый доступ к перспективным технологиям и успешному опыту ведущих российских и международных компаний мира по освоению шельфовых месторождений

200+ ДЕЛЕГАТОВ ЕЖЕГОДНО: представители высшего управленческого звена (руководство компаний-операторов или профильных подразделений)

МАКСИМУМ ОБЩЕНИЯ: дискуссии, круглые столы и другие интерактивные формы заседаний, а также широкие возможности для неформального общения с представителями ведущих российских и мировых игроков отрасли

ПОСТОЯННЫЕ УЧАСТНИКИ: крупнейшие компании-операторы на российском шельфе – Газпром, Роснефть и ЛУКОЙЛ

11

лет ведущему мероприятию отрасли, ежегодно проводимому при поддержке ОАО «Газпром»

200+

ведущих игроков отрасли

20+

авторитетный экспертно-аналитический

20

лет успешной практики RPI в сфере организации и проведения отраслевых форумов и конференций

ОСНОВНЫЕ ТЕМЫ

- Государственная политика недропользования на шельфе в России и за рубежом
- Экономические и нормативно-правовые аспекты освоения месторождений на шельфе
- Текущее развитие и планы реализации крупнейших российских шельфовых проектов
- Освоение шельфа южных, арктических и дальневосточных морей: опыт реализации проектов, проблемы и пути их решения
- Инновационные технологии и оборудование для шельфовых нефтегазовых проектов
- Развитие промысловой и транспортной инфраструктуры шельфовых проектов

ДОБЫЧА НЕФТИ И ГАЗА НА ШЕЛЬФЕ РОССИИ И СТРАН СНГ: ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТРАСЛИ ДО 2020 ГОДА



- Текущее описание состояния проектов, а именно планов их реализации или сворачивания;
- Информация о намерениях отдельных игроков выйти или войти в проекты;
- Прогнозы на период 2012-2020 годов добычи по отдельным проектам (и секторам в акваториях) в разрезе возможных сценариев;
- Прогнозы на период 2012-2020 годов объемов разведочного и эксплуатационного бурения в разрезе секторов в акваториях, проектов, игроков и возможных сроков выполнения буровых работ;
- Прогнозы на период 2012-2020 годов относительно потребности в буровых установках и добычных платформах в разрезе морских акваторий и проектов

МЕДИА-ПАРТНЕРЫ

СТРАТЕГИЧЕСКИЙ МЕДИАПАРТНЕР: **НЕФТЬ КАПИТАЛ**

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ МЕДИАПАРТНЕР: **интерфакс**

ОФИЦИАЛЬНЫЙ МЕДИАПАРТНЕР: **Neftgaz.RU**

ГЛАВНЫЙ ОТРАСЛЕВОЙ МЕДИАПАРТНЕР: **OGAS**

AK&M

АКЦИОНЕРНЫЙ

ГАЗПРОМ

ПравоТЭК

ГЕОИНФОРМАРК

ИНТЕРРАЛ

Нефть

ПРОМСТОИД

OGAS Eurasia

НЕФТЕСЕРВИС

СФЕРА

ТЕРАТОРИЯ НЕФТЕГАЗ

ROGTEC

Rustan

Worldoils

Murmanshelfinfo

НИЖНИЙ



+7 (495) 502 54 33
+7 (495) 778 93 32



Konstantinova.Elena@rpi-inc.ru



www.rpi-conferences.com

проектирования по методу предельных состояний в обобщенном виде записываются в виде

$$Q_d \leq R_d, \quad (1)$$

где Q_d – расчетное значение силового фактора, например, усилие, изгибающий момент, напряжение в рассматриваемом элементе проектируемого сооружения (или «эффекта воздействия» по новой терминологии [2]), которое рассчитывается для заданного сочетания приложенных нагрузок;

R_d – расчетное значение несущей способности элемента, обычно рассчитываемое через прочностные характеристики материала или грунта. (Отметим, что в нормативных документах соотношения типа (1) обычно встречаются в модифицированном виде – с дополнительными множителями. Для последующего анализа это не имеет принципиального значения, поэтому ниже для простоты мы будем использовать для критериев проектирования не совсем точное выражение (1)).

В свою очередь, расчетные значения определяются на основе нормативных значений Q_0, R_0 :

$$Q_d = \gamma_f Q_0, \quad R_d = R_0 / \gamma_m, \quad (2)$$

где γ_f и γ_m – так называемые частные коэффициенты надежности (по нагрузке и по материалу, соответственно).

Подчеркнем, что все указанные величины являются детерминистическими, поэтому при традиционном проектировании фактор случайности, по сути, исключен, а проявляется он лишь в рамках процедуры определения нормативных (или, напрямую, расчетных) значений нагрузок и прочности. Далее будем говорить лишь об эффектах воздействия и, соответственно, о нагрузках. В качестве нормативного значения нагрузки на сооружение (которая, напомним, имеет случайный характер) в общем случае принимается значение, имеющее заданный период повторяемости T . Период повторяемости может иметь разные значения для разных видов нагрузок. Для случая ледовой нагрузки современные нормы, например [3], рекомендуют значение $T = 100$ лет для основных сочетаний нагрузок и значение $T \sim 10^3 \dots 10^4$ лет для особых сочетаний.

Таким образом, согласно определению, под нормативным значением нагрузки понимается такое значение, обозначаемое q_α , которое может быть превышено в течение произвольного (наугад выбранного) года с вероятностью $\alpha = 1/T$, что можно записать в виде следующего уравнения:

$$Pr\{Q > q_\alpha \text{ хотя бы один раз в течение года}\} = \alpha, \quad (3)$$

Value α is called accumulated probability or occurrence; it is often expressed as a percentage value. We should note that $\alpha = 0,01$, or 1 %, for recurrence period $T = 100$ years. Sometimes condition (3) is better expressed as

$$Pr\{Q_{max} > q_\alpha\} = \alpha, \quad (4)$$

where Q_{max} is annual maximum of ice load.

Considering that ice load may occur under the influence of various ice formations (level ice, rafted ice, ridges, icebergs etc), thus equations (3) and (4) are normally written separately for different types of ice formations. That is why a few representative ice load values are used in design work corresponding to various design situations – action from level ice, rifted ice, ridges, icebergs etc.

Now let's introduce cumulative distribution function for Q_{max} value and denote it as $F_Q(x)$, so the equation (4) can be turned into:

$$F_Q(q_\alpha) = 1 - \alpha. \quad (5)$$

On the front, equation (5) seems very simple. A closer look, however, reveals that finding function $F_Q(x)$ is not at all a trivial task: it depends (and often in a very complicated way) on distribution functions of all values influencing the load as well as on geometrical properties of the structure under design. To illustrate the associated challenges we should mention that a different approach than equation (4) is used to determine representative load values for other natural load types such as wave loads or current loads, specifically:

$$Q_0 = Q(\omega_1, \omega_2, \dots), \quad (6)$$

where $\omega_1, \omega_2, \dots$ is a set of design parameters values for a design situation, and $Q(x_1, x_2, \dots)$ is the so called load formula. In cases of wave load for example, the set of parameters includes wave height of certain occurrence along with associated period and average wave length value. In cases of current, governing parameter is the current velocity of certain occurrence. It could also be noted that Russian codes up until recent times used a similar approach for estimating events of level ice impacts; governing parameters for this are representative ice thickness (at 1% occurrence) and the design ice strength. Note that $Q(x_1, x_2, \dots)$ are regular deterministic functions explicitly stated in corresponding structural codes.

Thus, design value for ice load in case with level ice, uses the following equation

$$Q_0 = m k_b k_v R_c D h_d, \quad (7)$$

where h_d is the design ice thickness at the platform location, R_c is the design compression resistance (strength) for ice, D – width of the structure affected by ice, k_b, k_v

ОРГАНИЗАТОРЫ:

Правительство ЯНАО:



Vostock Capital:

VOSTOCK CAPITAL



ЯМАЛ НЕФТЕГАЗ

единственная площадка международного уровня, которая собирает на Ямале высшее руководство российских и иностранных нефтегазовых компаний, высокопоставленных представителей власти ЯНАО и соседних округов, лучших мировых производителей технологий и оборудования, специалистов из ведущих научных институтов и ассоциаций для обсуждения и выработки стратегических решений по реализации мегапроектов, привлечению инвестиций и комплексному развитию нефтегазовой отрасли Ямальского региона.



Вопросы программы:

- 1 Развитие транспортной системы
- 2 Реализация мегапроектов региона
- 3 Инвестиции и финансирование
- 4 Комплексное освоение месторождений
- 5 Экология и технологии



ВЫСТАВКА: участие с выступлением и выставочным дисплеем для компаний-производителей оборудования.

Запланируйте участие сегодня! Количество дисплеев ограничено!

Узнайте
БОЛЬШЕ



Телефон в Москве: +7499 505 1 505
Телефон в Лондоне: +44 207 3943090
www.YamalOilandGas.com

Читателям журнала
скидка 5%

где $Pr\{A\}$ обозначает вероятность случайного события A . Величину α называют обеспеченностью; часто она выражается в процентах. Заметим, что $\alpha = 0,01$, или 1 %, для периода повторяемости $T = 100$ лет. Условие (3) иногда удобнее записывать в виде

$$Pr\{Q_{max} > q_{\alpha}\} = \alpha, \quad (4)$$

где Q_{max} – максимальное значение ледовой нагрузки в течение одного года.

Учитывая, что ледовая нагрузка может порождаться воздействием ледяных образований различного вида (ровный лед, наслоненный лед, торосы, айсберги и др.), условия (3) и (4) принято записывать по отдельности для ледяных образований разного типа. Поэтому в проектировании используют несколько нормативных значений ледовой нагрузки, соотнося их с разными расчетными ситуациями – воздействием ровного льда, наслоненного льда, торосов, айсбергов и др.

Если теперь ввести функцию распределения для величины Q_{max} и обозначить ее $F_Q(x)$, то уравнение (4) можно переписать в виде

$$F_Q(q_{\alpha}) = 1 - \alpha. \quad (5)$$

Внешне уравнение (5) выглядит очень просто. Однако при ближайшем рассмотрении выясняется, что нахождение функции $F_Q(x)$ является отнюдь не тривиальной задачей, поскольку она зависит (часто, весьма сложным образом) от функций распределения всех величин, которые влияют на нагрузку, а также от геометрических характеристик проектируемого сооружения. Чтобы пояснить возникающие трудности, укажем, что в случае других нагрузок природного характера, например, волновых или от течений, для определения нормативных значений нагрузок используется подход, несколько отличающийся от того, который реализуется посредством соотношения (4), а именно, применяется соотношение вида

$$Q_0 = Q(\omega_1, \omega_2, \dots), \quad (6)$$

где $\omega_1, \omega_2, \dots$ – набор расчетных значений параметров, характеризующих расчетную ситуацию, а $Q(x_1, x_2, \dots)$ – так называемая формула нагрузки. Например, в случае волновой нагрузки набор параметров включает в себя высоту волны заданной обеспеченности, а также ассоциированный период и среднее значение длины волны. Для случая течения определяющим параметром является скорость течения заданной обеспеченности. Можно также заметить, что и для расчетной ситуации воздействия ровного льда до последнего времени отечественными нормативными документами регламентировался аналогичный подход; при этом определяющими параметрами являлись

and m are some constants that only depend on structure geometry and h_d .

It is crucially important that representative value Q_0 has no (at least no explicitly stated) occurrence value assigned (this is why we use distinctly different symbols for related values of Q_0 and q_{α}), while occurrence requirements are applied to the parameters of “impacting” natural objects: wave height, current velocity, level ice thickness etc. This approach makes it possible to make a clear distinction between the stage of design preparation when design parameters of “impacting” natural objects are defined (this is traditionally done by specialized engineering research organizations) and the design stage of a project itself, when the engineer’s task is to ensure the accuracy of inequalities such as (1) with consideration of (2) and (7) by proper selection of suitable structural design and materials.

When we look at a “probabilistic approach to design work”, illustrated by equation (4), this effectively creates a catch twenty two situation: the design (development of construction solutions) can’t be performed until probability distributions $F_Q(x)$ are known for all estimated events, while these distributions can’t be calculated until structural design is available. Moreover, this challenge requires the surveyors to build probability distribution functions for all variables and factors affecting the loads (a large but incomplete number of which are listed above), whereas the conventional approach only envisages the determination of corresponding representative values at the survey stage. The former requires a significantly larger volume of observational data. This raises the following question - in this catch 22 situation, who is responsible for the adequacy of required probability distributions which must be known even to their tail values, including those for α reaching $10^{-3} \dots 10^{-4}$, and even up to 10^{-5} ?

The RF Government is active in updating its regulatory construction framework, including that for the design of offshore oil and gas facilities. With that, new or updated regulatory documents enforce the probabilistic approach for design criteria as in equation (4) (see e.g. [4]). Unfortunately, the authors of these documents fail to consider that the probabilistic design approach requires a) enormous volumes of initial data (unobtainable through conventional engineering research; especially considering that regulatory norms for design engineering surveys do not include any such new “probabilistic” requirements) and b) subsequent laborious work on constructing probabilistic load distribution functions $F_Q(x)$. This makes it hard to expect actual adherence to the requirements of probabilistic criteria such as (4) in design of offshore platforms. There is the hazard that even if these are performed practically, it would only be formal: using some surrogate distributions $F_Q(x)$, the reliability of which is next to impossible to substantiate. This, in turn, may negatively impact the reliability of the designed facility.



ATYRAU OIL & GAS

**13th North Caspian Regional Atyrau
Oil & Gas Exhibition**

**8th Atyrau Regional
Petroleum Technology Conference**



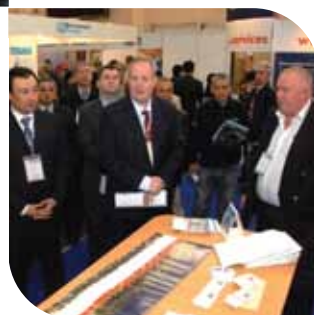
1-3

April 2014

Atyrau Sports Complex
Atyrau • Kazakhstan



**OILTECH
ATYRAU**



1-2

April 2014

Renaissance Hotel
Atyrau • Kazakhstan

www.atyrauoilgas.com
www.oiltech-atyrau.com

**The Business Event
for Exploration and Production
in the Region**



Tel. +44 (0) 20 7596 5082 Email: og@ite-events.com

London • Moscow • Almaty • Baku • Tashkent • Atyrau • Aktau • Istanbul • Hamburg • Beijing • Poznan • Dubai

расчетная толщина льда (1% ной обеспеченности) и расчетное значение предела прочности льда. Заметим, что функции $Q(x_1, x_2, \dots)$ являются обычными детерминистическими функциями, в явном виде приводимые в соответствующих нормативных документах. Скажем, для случая ровного льда соотношение (6) для нормативной нагрузки записывается в виде

$$Q_0 = m k_b k_V R_c D h_d, \quad (7)$$

где h_d – расчетная толщина льда в точке установки платформы, R_c – расчетное значение предела прочности льда при сжатии, D – ширина сооружения, на которое воздействует лед, а k_b , k_V и m – некоторые константы, зависящие лишь от геометрии сооружения и от h_d .

Принципиально важно, что нормативному значению нагрузки Q_0 не приписывается (по крайней мере, в явном виде) никакого значения обеспеченности (по этой причине мы используем два различных обозначения для родственных величин Q_0 и q_a), а требования по обеспеченности применяются к характеристикам «воздействующего» природного объекта: высоте волны, скорости течения, толщине ровного льда. В такой ситуации оказывается возможным установить четкий водораздел между этапом подготовки исходных данных для проектирования, в ходе которого определяются расчетные характеристики «воздействующих» природных объектов (традиционно, это задача специализированных организаций, выполняющих инженерные изыскания), и этапом собственно проектирования, где задачей проектировщика является обеспечить за счет выбора конструктивной схемы и материалов выполнение неравенств типа (1) с учетом (2) и (7).

В случае же так называемого «вероятностного подхода к проектированию», выражаемого условием (4), возникает, вообще говоря, порочный круг: проектирование (разработку конструктивных решений) невозможно начать, пока неизвестны вероятностные распределения $F_Q(x)$ для всех расчетных сценариев, а рассчитать указанные распределения в свою очередь нельзя, пока нет конструктивной схемы. Более того, в этой ситуации перед изыскателями должна ставиться задача построения вероятностных функций распределения для всех величин и факторов, влияющих на нагрузки (обширный, хотя и не полный, список таковых был приведен выше), в то время как при традиционном подходе на стадии изысканий определяются лишь нормативные значения соответствующих величин. Первое требует значительно большего объема натурных данных. Возникает вопрос, кто в этой закольцованной

3 Requirements for iceberg impact design load

The assertions above are not to say that probabilistic methods have no place in design work: they are only to state the necessity a clear understanding of which issues can better be resolved by applying probability theory for developing specific design solutions.

One such issue is the assessment of iceberg hazards for platforms located in offshore areas where icebergs drifts are probable. For the purposes of design, iceberg to platform collision should be considered as a special load. Below we list the examples of constructing a probabilistic model which enables us to form “a hazard” and the estimation of corresponding quantitative indicators. Some studies on this matter use the term “risk”. Formally, it includes assessment of unfavorable consequences along with determination of probability for unfavorable events. Because this paper does not describe the consequences of a possible iceberg collision, we shall not use the term “risk”.

Some iceberg hazard parameters are:

- » probability of iceberg to platform collision during a one year period;
- » probability of collision during one a year period for an iceberg with dimensions and mass exceeding an established value;
- » probability of collision during a one year period for an iceberg with kinetic energy value above the established;
- » probability of collision for an iceberg approaching the platform from distance L ;
- » probability of collision during one year period with global load on the platform below the established value and etc.

We should note that the probability of an iceberg collision (to be more precise, the assessment of probability calculated based on available statistical data using one or another probability model) can't by itself be considered as a comprehensive data set required to complete a platform design. Actually, if only small icebergs or their bergy bits reach the offshore field, then the corresponding design situation apparently won't be crucial for the design, while should there exist a probability of an even rare occurrence of large iceberg collisions, it has to be taken into account. Thus, one of possible formalization options envisages the requirement of calculating such parameters is the probability for the platform with known shape and size to be impacted by an iceberg with kinetic energy above an established value for a given time period [5].

The general design criteria require the platform to maintaining its bearing capacity under the influence of certain design loads. Let us examine this issue in relation to the load on a possible iceberg to platform collision. The first thing to mention is that an estimated iceberg collision is rare [6]. This means that the actual structure built to serve

Россия, Москва, Центральный
выставочный комплекс «Экспоцентр»

5-Й МЕЖДУНАРОДНЫЙ ФОРУМ

ЭНЕРКОН



ОТ СОВРЕМЕННЫХ НЕФТЕГАЗОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ К СТАБИЛЬНОМУ
ОТРАСЛЕВОМУ РАЗВИТИЮ

26-28 мая 2014

Организаторы:



ЭКСПОЦЕНТР

Исполнительный комитет:



PROMEXPO
group

Тел.: +7 (495) 921-3507
enercon@promexpogroup.ru



схеме отвечает за достоверность необходимых вероятностных распределений, которые, к тому же, требуется знать в области «хвостов» вероятностных распределений, в том числе при значениях α порядка $10^{-3} \dots 10^{-4}$, а то и 10^{-5} ?

В настоящее время в Российской Федерации активно идет процесс по обновлению нормативной базы в строительстве, в том числе, для проектирования морских нефтегазопромысловых объектов. При этом в новых, или актуализированных, версиях нормативных документов закрепляется «вероятностная» формулировка критериев проектирования – в форме (4) (см. например, [4]). К сожалению, разработчики этих документов абсолютно не принимают во внимание, что для выполнения «вероятностного» проектирования требуется а) колоссальный объем исходных данных (который невозможно получить в рамках традиционных инженерных изысканий; к тому же, в документах, регламентирующих инженерные изыскания для проектирования, никаких новых «вероятностных» требований не добавляется) и б) последующая очень трудоемкая работа по построению вероятностных функций распределения нагрузок $F_Q(x)$. Поэтому трудно ожидать, что требования об удовлетворении вероятностных критериев типа (4) при разработке проектов морских платформ реально выполнимы. Существует опасность, что если они и будут исполняться на практике, то лишь формально – с использованием неких суррогатных распределений $F_Q(x)$, надежность которых практически невозможно обосновать. Это в свою очередь может негативно сказаться на уровне надежности запроектированного сооружения.

3 Требования к расчетной нагрузке от воздействия айсберга

Сказанное выше отнюдь не означает, что вероятностным подходам не место в проектировании. Речь идет только о том, что необходимо ясно представлять, при решении каких задач аппарат теории вероятностей способен оказать реальную помощь для обоснования тех или иных проектных решений.

Одной из таких задач является оценка айсберговой опасности для платформ, размещаемых на акваториях, где возможно появление айсбергов. С точки зрения проектирования столкновение айсберга с платформой должно рассматриваться как особая нагрузка. Ниже будут приведены примеры построения вероятностной модели, в рамках которой удастся формализовать понятие «опасность» и рассчитывать соответствующие количественные показатели. Иногда в исследованиях по данной тематике используется термин «риск». Формально он подразумевает определение не только вероятностей нежелательных событий, но и

for a period of 25-50 years (in most cases) will almost never experience an iceberg collision. Still, the collision probability does not equal zero. To this extent, one known “onshore” analogue is the seismic load.

“Probabilistic” design corresponds to the latter of the listed iceberg hazard factors. The resulting load for an iceberg to platform collision will significantly depend on the local shape of the iceberg surface coming into contact with the platform hull.

Resolving the task of calculating estimated load q_{α} from an iceberg collision (at $\alpha \sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$) includes a number of interrelated factors. The necessary input data can provisionally be divided in 3 large units.



Unit 11: statistical data on iceberg observations, their shapes and sizes near the platform location. With that, due to the rare occurrence of such events, statistically solid data would require very long observation data sets; it is apparent that a standard 5-year survey cycle by itself won't provide the required volumes of information, and therefore archive data analysis is required. For example, corresponding databases were created in Canada for the Grand Banks of Newfoundland and in Russia for the Barents Sea ([7,8]).



**CASPIAN
OIL & GAS**

21-я АЗЕРБАЙДЖАНСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ

НЕФТЬ И ГАЗ КАСПИЯ

3 - 6
ИЮНЯ 2014
БАКУ
АЗЕРБАЙДЖАН



www.caspianoilgas.ru

**ВЕДУЩЕЕ НЕФТЕГАЗОВОЕ
МЕРОПРИЯТИЕ
КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА**



оценку неблагоприятных последствий. Поскольку в данной работе вопрос о последствиях возможного столкновения с айсбергом не затрагиваются, то термин «риск» мы не будем использовать.

Характеристиками айсберговой опасности могут служить:

- » вероятность столкновения платформы с айсбергом в течение одного года;
- » вероятность столкновения в течение года с айсбергом, имеющим размер(ы) или массу не меньше заданного значения;
- » вероятность столкновения в течение года с айсбергом, имеющим кинетическую энергию не ниже заданной;
- » вероятность для айсберга, подошедшего к платформе на расстояние L , столкнуться с платформой;
- » вероятность столкновения с айсбергом в течение года, при котором глобальная нагрузка на платформу будет не ниже заданной, и др.

Заметим, что вероятность столкновения с айсбергом (более точно, оценка вероятности, рассчитанная на основе доступной статистической информации с помощью той или иной вероятностной модели) сама по себе не может предоставить исчерпывающую информацию для выполнения проекта морской платформы.

Действительно, если в районе морского месторождения возможно появление лишь небольших айсбергов (или их обломков), то соответствующая расчетная ситуация, видимо, не будет определяющей для проектирования. Если же имеются основания ожидать, хоть и не очень часто, появление крупных айсбергов, то эта расчетная ситуация должна быть учтена. Один из возможных вариантов формализации выражается, например, в требовании рассчитать такую характеристику, как вероятность столкновения платформы с известными геометрическими размерами в течение заданного периода времени с айсбергом, кинетическая энергия которого имеет значение не ниже заданной величины [5].

Универсальным критерием проектирования является совокупность требований о сохранении проектируемым сооружением несущей способности при воздействии расчетных нагрузок. Рассмотрим этот вопрос применительно к нагрузке, порождаемой возможным столкновением с айсбергом. Сразу необходимо отметить, что расчетная ситуация, соответствующая столкновению с айсбергом, относится к так называемым редким событиям [6]. Это означает, что реальное сооружение, эксплуатационный срок службы которого в большинстве случаев

Unit I2: The physical and mechanical model of an iceberg to platform collision, which includes ice destruction patterns near the impact area and describes an iceberg's dynamic behavior during the collision. A number of such models was developed (see e.g. [9-11]). However, a few problems remain somewhat unresolved. In particular, there are challenges related to modeling the dependency of the collision area based on the penetration depth of the collision, which largely determines the intensity of the impact to the platform (an example of resolving such task can be found in [12]), along with consideration of hydrodynamic effects occurring when two massive bodies (iceberg and platform) come close to each other.

Unit I3: iceberg drift model (e.g. rectilinear or chaotic) near the platform location. Main “moving” factors are near-surface currents, winds and, possibly, ice cover. Because the iceberg trajectory observations data are insufficient to obtain reliable statistical conclusions on spatial and time parameters of iceberg trajectories, developing adequate and efficient “atmosphere-ice-ocean” models would assist in finding a solution for this task.

In general cases, the equation required to find design value q_{α} with consideration of (6) can be expanded to

$$Pr\{max Q(\omega^{(i)}) > q_{\alpha}\} = \alpha, \quad (8)$$

where $\omega^{(i)} = (\omega_1^{(i)}, \omega_2^{(i)})$ is the aggregate of all random parameters influencing the ice load (for an iceberg, that would be its velocity at collision, its mass and inertia moments ice strength and surface shape at the zone of contact and etc. – these parameters appear in units I1 and I2); $i = 1, \dots, N$ are all iceberg interactions on a platform during one year period (usually N being the number of collisions is random and the case of $N = 0$ is not excluded; pertaining to unit I3), and

$$Q = Q(\omega) \quad (9)$$

is the iceberg load formula used to calculate maximum load for a specific single collision event with prescribed values of random parameters ω (unit I2).

Various approaches can be used to model iceberg hazards [3, 5, 12-16]. Most of these use the Monte Carlo statistical method. Below is a modification of an approach developed by the pioneering works of Canadian specialists [5,6], which make it possible to obtain estimated correlations in any analytical form. Another example of implementing a modified approach for a population of ice flows affecting the platform can be found in article [17].

End of Part 1



Московские нефтегазовые конференции

Ежегодные встречи нефтяников и газовиков в отеле InterContinental Moscow Tverskaya



18 марта 2014

НЕФТЕГАЗСНАБ Снабжение в нефтегазовом комплексе

Конференция собирает руководителей служб материально-технического обеспечения нефтегазовых компаний. Обсуждается организация закупочной деятельности, целесообразность закупок по импорту, процедуры отбора поставщиков, приемка оборудования, информационное обеспечение рынка



22 мая 2014

НЕФТЕГАЗСТРОЙ Строительство в нефтегазовом комплексе

Формирование цивилизованного рынка в нефтегазовом строительстве, практика выбора строительных подрядчиков, инжиниринговых организаций, создание СП с иносфирмами, расширение сферы деятельности российских подрядчиков, оценка качества работ – основные проблемы, рассматриваемые на конференции "Нефтегазстрой"



11 сентября 2014

НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБОТКА Модернизация переработки нефти и газа

Увеличение глубины переработки сырья и введение новых экологических стандартов требуют реконструкции действующих мощностей. На конференции обсуждается практика работы с инжиниринговыми компаниями, а также модели управления инвестиционными проектами



9 октября 2014

НЕФТЕГАЗСЕРВИС Нефтегазовый сервис в России

Традиционная площадка для встреч руководителей геофизических, буровых предприятий, а также компаний, занятых ремонтом скважин. Подрядчики в неформальной обстановке обсуждают актуальные вопросы со своими заказчиками – нефтегазовыми компаниями



4 декабря 2014

НЕФТЕГАЗШЕЛЬФ Подряды на нефтегазовом шельфе

Заказчиками выступают ОАО "Газпром", НК "Роснефть", НК "ЛУКОЙЛ" и ряд иностранных компаний. На конференции "Нефтегазшельф" представлены также фирмы Норвегии, США и Великобритании, имеющие большой практический опыт работы на нефтегазовом шельфе

Телефоны: (495) 514-44-58, 514-58-56; info@n-g-k.ru; www.n-g-k.ru

Новые встречи – новые возможности!

n-g-k.ru

составляет 25-50 лет, практически наверняка ни разу не будет подвергнуто воздействию айсберга. Тем не менее, вероятность столкновения отлична от нуля. В этом смысле, известным “сухопутным” аналогом служит сейсмическая нагрузка.

Отметим, что «вероятностному» проектированию отвечает последняя формулировка из вышеприведенного перечня, описывающего возможные показатели айсберговой опасности. Результирующая нагрузка при контактном взаимодействии айсберга с платформой существенным образом зависит от особенностей формы локального участка поверхности айсберга, непосредственно вступающего в контакт с корпусом платформы.

Задача нахождения расчетной нагрузки q_a от воздействия айсберга (при $\alpha \sim 10^{-4} \dots 10^{-5}$) объединяет в себе несколько взаимосвязанных аспектов. Необходимая “входная” информация условно может быть подразделена на 3 крупных блока.

Блок I1: статистические данные о появлении айсбергов в районе размещения платформы и об их размерах и форме. При этом, в силу редкой повторяемости соответствующих событий, для получения данных с достаточной степенью статистической достоверности требуются очень длинные ряды наблюдений; очевидно, стандартный 5-летний цикл изыскательских работ сам по себе не в состоянии обеспечить необходимый объем данных – требуется анализ архивных данных. Соответствующие базы данных созданы, например, в Канаде для района Большой Ньюфаундленской банки и в России для Баренцева моря ([7,8]).

Блок I2: физико-механическая модель взаимодействия айсберга с платформой, которая включает в себя механизмы разрушения льда в зоне контакта и описание динамического поведения айсберга в процессе контакта. Был разработан ряд моделей такого рода (см., например [9-11]). Тем не менее, существует несколько не до конца решенных проблем. В частности, трудности возникают при построении зависимости площади контакта от глубины внедрения при навале айсберга на платформу, которой во многом определяет интенсивность воздействия на платформу (пример подхода к рассмотрению этой задачи можно найти в [12]), а также, например, при учете гидродинамических эффектов, возникающих при сближении двух массивных тел – айсберга и платформы.

Блок I3: модель дрейфа айсбергов (например, прямолинейное или хаотичное) в районе, где

List of literature

1. WMO sea ice nomenclature. WMO/OMM/BMO – No. 259. Amendment No. 5 (2004). [Digital resource] URL: http://www.aari.ru/gdsidb/XML/wmo_259.php?lang0=1. (as displayed on 15.11.2013)
2. GOST R 54257-2010 Reliability of structures and foundations in construction. Principal provisions and requirements.
3. ISO 19906:2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures
4. SP 38.13330.2012 Loads and impacts on hydrotechnical facilities (from waves, ice and vessels) (updated version of SNiP 2.06.04-82*).
5. Dunwoody A.B. The design ice island for impact against an offshore structure. Proc. 15th Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1983, p. 325–332.
6. S471-04 General requirements, design criteria, the environment, and loads. CSA, 2004.
7. Verbit S., Comfort G., Timco G. Development of a database for iceberg sightings off Canada's east coast. Proc. 18th Int. Symposium on Ice, IAHR'06, Sapporo, Japan, 2006. Vol. 2, pp. 89–96.
8. Naumov A.K., Zubakin G.K., Gudoshnikov Yu.P., Buzin I.V., Skutin A.A. Ice and icebergs near Shtokman gas condensate field. Works for international conference “Developing Russian sea shelves” (RAO-03), St. Petersburg, Sept. 16–19, 2003, pp. 337–342.
9. Vershinin S.A., Nagrelli V.E., Yermakov S.V., Onishchenko D.A. Impact interaction of iceberg and ice-resistant offshore platform for the Shtokmanovskoye field. Proc. First Int. Conf. on Development of the Russian Arctic Offshore, St. Petersburg, Russia, 1993, pp. 192–196.
10. Matskevitch D.G. Eccentric impact of an ice feature: linearized model. Cold Region Science and Technology, Vol. 25 (1997), pp. 159–171.
11. Matskevitch D.G. Eccentric impact of an ice feature: non-linear model. Cold Region Science and Technology, Vol. 26 (1997), pp. 55–66.
12. Fuglem M., Mugeridge K., Jordaan I. Design load calculations for iceberg impacts. Int. J. Offshore and Polar Engineering, Vol. 9. No. 4 (1999), pp. 298–306.
13. Nevel D. Ice force probability issues. Proc. IAHR Ice Symposium, Banff, Canada, 1992, pp. 1497–1506.
14. Korsnes R., Moe G. Approaches to find iceberg collision risks for fixed offshore platforms. Int. J. Offshore and Polar Engineering, Vol. 4. No. 1 (1994), pp. 48–52.
15. Fuglem M., Jordaan I., Crocker G. Iceberg-structure interaction probabilities for design. Can. J. Civ. Eng., Vol. 23 (1996), pp. 231–241.
16. Naumov A.K. Distribution of icebergs near Shtokman gas condensate field and assessment of iceberg to platform collisions. Lib.: Complex research for ice and hydrometeorological events and processes near the Arctic shelf. Works of AARI, v. 449, St. Petersburg, 2004, pp. 140–152.
17. Onishchenko D.A. Probabilistic modeling as a tool to determine estimated ice loads in arctic shelf environment. Science and technology for the gas industry, №1 (2006), pp. 62–80.

находится платформа. Основными “движущими” факторами являются приповерхностные течения и ветер, а также, возможно, ледяной покров. Поскольку данных о непосредственных наблюдениях траекторий движения отдельных айсбергов обычно недостаточно для получения надежных статистических выводов о пространственно-временных параметрах траекторий айсбергов, то разработка адекватных и эффективных моделей типа “атмосфера-лед-океан” могла бы помочь в решении этой задачи.

В общем случае определяющее уравнение для нахождения расчетного значения q_a с учетом (6) может быть записано в виде

$$Pr\{max Q(\omega^{(i)}) > q_a\} = \alpha, \quad (8)$$

где $\omega^{(i)} = (\omega_1^{(i)}, \omega_2^{(i)})$ – совокупность всех случайных параметров, влияющих на ледовую нагрузку (для айсберга это его скорость в момент соударения, масса и моменты инерции, прочность льда и форма поверхности в зоне контакта и др. – эти параметры появляются в блоках I1 и I2); $i = 1, \dots, N$ – все случаи воздействия айсберга на платформу в течение года (обычно N – число соударений – является случайным, при этом не исключается случай $N = 0$; относится к блоку I3), а

$$Q = Q(\omega) \quad (9)$$

– формула нагрузки для случая айсберга, по которому вычисляется максимальная нагрузка, возникающая в одном отдельно взятом событии взаимодействия платформы с айсбергом при детерминированных значениях случайных параметров ω (блок I2).

Для моделирования айсберговой опасности могут быть применены различные подходы [3, 5, 12–16]. В большинстве из них применяется метод статистического моделирования Монте-Карло. Ниже описывается модификация подхода, разработанного в пионерских работах канадских специалистов [5, 6], рамках которой удается получать расчетные соотношения в аналитической форме. Другой пример реализации модифицированного подхода применительно к совокупности ледяных полей, воздействующих на платформу, приведен в работе [17].

Конец первой части

Список литературы

1. Номенклатура ВМО по морскому льду. WMO/OMM/ВМО – No. 259. Дополн. No. 5 (2004). [Электронный ресурс] URL: http://www.aari.ru/gdsidb/XML/wmo_259.php?lang0=1. (Дата обращения: 15.11.2013)
2. ГОСТ Р 54257-2010 Надежность строительных

конструкций и оснований. Основные положения и требования.

3. ISO 19906:2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures
4. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) (актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*).
5. Dunwoody A.B. The design ice island for impact against an offshore structure. Proc. 15th Offshore Technology Conference, Houston, USA, 1983, p. 325–332.
6. S471-04 General requirements, design criteria, the environment, and loads. CSA, 2004.
7. Verbit S., Comfort G., Timco G. Development of a database for iceberg sightings off Canada's east coast. Proc. 18th Int. Symposium on Ice, IAHR'06, Sapporo, Japan, 2006. Vol. 2, pp. 89–96.
8. Наумов А.К., Зубакин Г.К., Гудошников Ю.П., Бузин И.В., Скутин А.А. Льды и айсберги в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения. Труды межд. конференции “Освоение шельфа России” (RAO-03), Санкт-Петербург, 16–19 сент. 2003, pp. 337–342.
9. Vershinin S.A., Nagrelli V.E., Yermakov S.V., Onishchenko D.A. Impact interaction of iceberg and ice-resistant offshore platform for the Shтокмановskoye field. Proc. First Int. Conf. on Development of the Russian Arctic Offshore, St.Petersburg, Russia, 1993, pp. 192–196.
10. Matskevitch D.G. Eccentric impact of an ice feature: linearized model. Cold Region Science and Technology, Vol. 25 (1997), pp. 159–171.
11. Matskevitch D.G. Eccentric impact of an ice feature: non-linear model. Cold Region Science and Technology, Vol. 26 (1997), pp. 55–66.
12. Fuglem M., Muggeridge K., Jordaan I. Design load calculations for iceberg impacts. Int. J. Offshore and Polar Engineering, Vol. 9. No. 4 (1999), p. 298–306.
13. Nevel D. Ice force probability issues. Proc. IAHR Ice Symposium, Banff, Canada, 1992, pp. 1497–1506.
14. Korsnes R., Moe G. Approaches to find iceberg collision risks for fixed offshore platforms. Int. J. Offshore and Polar Engineering, Vol. 4. No. 1 (1994), p. 48–52.
15. Fuglem M., Jordaan I., Crocker G. Iceberg-structure interaction probabilities for design. Can. J. Civ. Eng., Vol. 23 (1996), pp. 231–241.
16. Наумов А.К. Распределение айсбергов в районе Штокмановского газоконденсатного месторождения и оценки столкновения айсберга с платформой. В кн.: Комплексные исследования и изыскания ледовых и гидрометеорологических явлений и процессов на арктическом шельфе. Труды ААНИИ, т. 449, С.-Петербург, 2004, с. 140–152.
17. Онищенко Д.А. Вероятностное моделирование как инструмент определения расчетных ледовых нагрузок в условиях арктического шельфа. Наука и техника в газовой промышленности, №1 (2006), с. 62–80.