

УДК 622.279.04.:551.321.81

## Методические аспекты определения расчетных нагрузок низкой обеспеченности на примере ледовых воздействий на морские сооружения

Д.А. Онищенко<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Российская Федерация, 142717, Московская обл., Ленинский р-н, пос. Развилка, Проектируемый пр-д № 5537, вл. 15, стр. 1

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Российская Федерация, 119526, Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

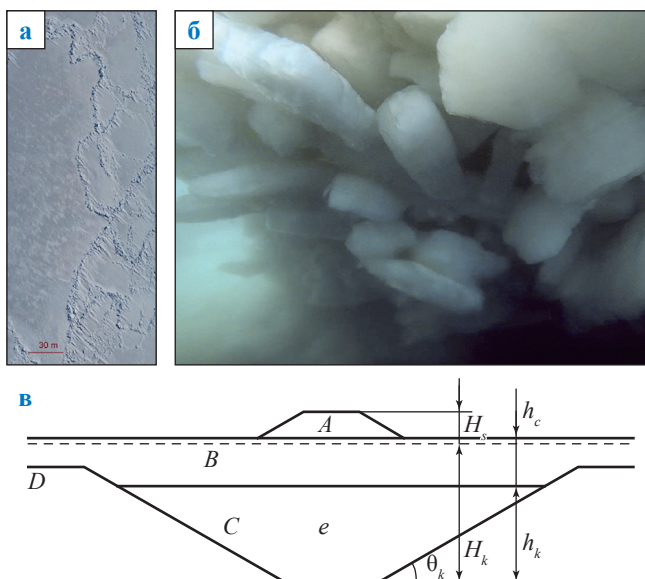
\* E-mail: D\_Onishchenko@vniigaz.gazprom.ru

**Тезисы.** В работе применительно к морским сооружениям обсуждаются методические аспекты определения расчетных ледовых нагрузок низкой обеспеченности (большого периода повторяемости) для характерных ледяных образований – торосов. Приведены результаты сопоставительного анализа нормативных требований в части расчета ледовых нагрузок на морские платформы, содержащихся в основных действующих нормативно-технических документах, которые должны использоваться при проектировании морских платформ. Установлено, что имеет место определенная нестыковка нормативных положений в различных документах, включая требования к уровню обеспеченности нормативных и расчетных значений ледовых нагрузок. На первый взгляд, в силу высокой пространственной и временной изменчивости характеристик ледяного покрова, многократно воздействующего в течение года на морскую платформу в результате своего дрейфа, очевидным представляется вывод, что задача определения ледовых нагрузок может быть корректно сформулирована только в вероятностной постановке, но не в детерминистической. Поскольку срок эксплуатации морской платформы в типичном случае может составлять несколько десятков лет, то вероятностный подход предопределяет, что расчетное значение максимального за один год нагрузочного эффекта от воздействия тороса на платформу целесообразно назначать на уровне обеспеченности  $10^{-4}$ . С учетом того, что общее количество воздействующих на платформу в течение года торосов в типичном случае составляет несколько сотен или даже тысяч, описанная в статье методология позволяет сделать вывод, что при проектировании морской платформы необходимо рассчитывать нагрузку от однократного воздействия тороса на уровне обеспеченности порядка  $10^{-6} \dots 10^{-7}$ . Принимая во внимание ограниченный объем доступных натуральных данных по торосам, корректное описание вероятностных распределений описывающих торос случайных параметров (осадка килля, толщина консолидированного слоя, толщина примыкающего к торосу ровного льда, длина гряды торосов, прочность льда и др.) на правых «хвостах» в области указанных значений обеспеченности представляется невозможным. При этом попытки использовать «усеченные» справа вероятностные распределения (чтобы искусственно не допускать больших значений определяющих параметров) приводят, как показано в статье на конкретных примерах, к ситуации, когда значение нагрузки требуемой низкой обеспеченности фактически рассчитывается по максимальным значениям параметров, соответствующих точкам «усечения», что фактически является детерминистическим подходом к расчету нагрузок. В заключение обсуждается вопрос о рациональном количестве учитываемых случайных параметров и сочетании вероятностного и детерминистического подходов к назначению расчетных значений ледовых нагрузок.

**Ключевые слова:** ледяной торос, ледовая нагрузка, расчетное значение, нормативное значение, морская платформа, обеспеченность, вероятностное моделирование.

Хорошо известно, что почти все районы российского шельфа, где обнаружены месторождения углеводородов или предполагается их наличие, расположены в ледовитых морях. Поэтому практически всегда – за исключением сейсмоопасных районов – определяющей нагрузкой от воздействия природной среды на стационарные или плавучие нефтегазопромысловые платформы (далее для краткости – платформы) является ледовая нагрузка.

Ледяной покров морей весьма разнообразен: ровный лед и деформированный лед, при этом 2-я группа включает в себя наслоенный и торосистый лед, поля сморози, гряды торосов, стамухи и др. (полный перечень видов и форм морского льда содержится в Номенклатуре морского льда [1]). Кроме того, в составе ледяного покрова в некоторых морях присутствуют айсберги, которые состоят из пресноводного льда материкового происхождения.



**Рис. 1. Структурное строение гряды торосов:**  
**а** – типичный вид сверху ледяного поля с торосами (надводная часть гряды); **б** – типичный вид подводной части гряды; **в** – расчетная схема тороса (поперечное сечение). Структурные элементы тороса: *A* – парус; *B* – консолидированный слой; *C* – киль; *D* – ровный лед, окружающий торос. Параметры тороса:  $H_s$  – высота паруса;  $H_k$  – осадка киля;  $h_c$  – толщина консолидированного слоя;  $h_k$  – толщина киля (неконсолидированной части тороса – нагромождения ледяных обломков);  $\theta_k$  – угол наклона подводного нагромождения ледяных обломков к горизонту

При проектировании морских платформ, как и любых других сооружений, согласно принятой в отечественной практике методологии проектирования по предельным состояниям [2] необходимым этапом является определение нормативных и расчетных нагрузок. Соответствующие значения требуется определять для заданных уровней обеспеченности или, иначе, вероятности превышения – обычно в течение периода времени, равного одному году. Поскольку характерный срок эксплуатации платформ составляет десятки лет, обеспеченность назначается на достаточно низком уровне – порядка  $10^{-2} \dots 10^{-4}$ .

В статье обсуждаются методические аспекты расчета нагрузок низкой обеспеченности на примере одного из наиболее характерных ледяных образований – гряды торосов (далее для краткости – торосов, рис. 1). Описываются соответствующая вероятностная модель и результаты ее численного анализа, а также обсуждаются проблемные моменты, связанные с процедурой выполнения расчетов.

Сначала приведем краткий анализ требований в части расчета ледовых нагрузок на морские платформы, содержащихся в основных действующих нормативно-технических документах, которые должны использоваться при проектировании морских платформ. К сожалению, имеет место определенная нестыковка нормативных положений в различных документах, поэтому целесообразно изложить их в сопоставлении.

Прежде всего, отметим, что «основным условием надежности строительных объектов является выполнение требований (критериев) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы» [2, п. 3.3]. В общем случае критерий предельного состояния имеет следующий вид:

$$Q_d < \frac{\gamma_d}{\gamma_n} R_d, \quad (1)$$

где  $Q_d$  – расчетное значение обобщенного нагрузочного эффекта воздействия (сила, момент, напряжение, деформация и др.) для отдельного структурного элемента или для сооружения в целом;  $R_d$  – расчетное значение обобщенной характеристики прочности (используются и другие синонимичные термины: несущая способность, предельное сопротивление);  $\gamma_d$  – коэффициент условий работы (обозначение приведено по ГОСТ 27751-2014 [2], часто используется также обозначение  $\gamma_c$ );  $\gamma_n$  – коэффициент надежности по ответственности сооружения. Очевидно, что значения величин  $Q_d$  и  $R_d$  зависят в том числе от формы и размеров проектируемого сооружения<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> При проектировании оснований гидротехнических сооружений традиционно используется модифицированная форма записи основного критерия (1):

$$\gamma_{lc} Q_d < \frac{\gamma_d}{\gamma_n} R_d,$$

где в левой части присутствует дополнительный множитель  $\gamma_{lc}$ , называемый коэффициентом сочетаний нагрузок [3]. Значение этого коэффициента равно 1 для основных сочетаний нагрузок и 0,9 для особых сочетаний. Не вдаваясь в детали мотивации введения данного коэффициента и его влияния на проектные расчеты, отметим неудачный выбор его наименования (термин «коэффициент сочетаний» закреплен за значениями «веса», с которым отдельные виды нагрузок входят в расчетное сочетание нагрузок и используются при вычислении величины  $Q_d$  [4]; см. также текст далее), а также тот факт, что в аналогичном СП 23.13330.2018 [3] «сухопутном» документе по проектированию фундаментов и оснований [5] коэффициент  $\gamma_{lc}$  отсутствует.

Коэффициент  $\gamma_d$  в формуле (1) учитывает риск возможного отклонения расчетной схемы конструктивных элементов и узлов строительного объекта от условий его реальной работы, понижает характеристику прочности и принимает значения, меньшие или равные 1. Коэффициент  $\gamma_n$  учитывает назначение проектируемого сооружения, а также социальные, экологические и экономические последствия его возможного повреждения и разрушения. Для сооружений повышенного уровня ответственности КС-3, к которым относятся морские платформы, значение коэффициента  $\gamma_n$  также понижает характеристику прочности и в общем случае при проверке критериев по 1-й группе предельных состояний устанавливается не ниже 1,1 [2]. При этом для гидротехнических сооружений, для которых работа системы «сооружение – основание» во многих случаях аналогична таковой для морских стационарных платформ, нормами проектирования установлено значение  $\gamma_n = 1,25$  [3].

Важно отметить, что критерий проверки предельных состояний в традиционной форме (1) имеет детерминистический характер, а все вероятностные аспекты «скрыты» в процедурах определения величин  $Q_d$  и  $R_d$ .

В общем случае расчетные значения характеристик материалов и грунтов,  $R_d$ , определяют делением нормативного значения этих характеристик ( $R_0$ ) на коэффициент надежности по материалу ( $\gamma_m$ ), больший либо равный 1 (в случае грунта обычно используется обозначение  $\gamma_g$ ) [2, п. 7.9]:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_m} R_0. \quad (2)$$

Соответствующие нормативно-технические документы либо непосредственно указывают, какие значения величин  $R_0$  и  $\gamma_m$  ( $\gamma_g$ ) следует использовать проектировщику, либо содержат однозначно определенную процедуру их вычисления на основе данных испытаний образцов материала или грунта. Предполагая, что значение прочностной характеристики  $R_d$  определено тем или иным способом (а это означает, что правая часть неравенства (1) имеет конкретное числовое значение), перейдем к рассмотрению нагрузочного эффекта.

Во-первых, отметим, что  $Q_d$  относится к достаточно продолжительному периоду времени ( $T$ ): длительность разработки морского месторождения составляет обычно несколько

десятков лет (приблизительно 50 лет; в запас по надежности примем для дальнейшего рассмотрения характерный период времени  $T = 100$  лет). Отсюда следует, что условие надежности платформы будет выполнено в период эксплуатации, если в течение всех  $T$  лет будет выполняться условие

$$Q(t) < \frac{\gamma_d}{\gamma_n} R_d, \quad (3)$$

где в левой части стоит не конкретное числовое значение  $Q_d$  (которое проектировщику платформы предстоит рассчитать на этапе проектирования), а «реальный» нагрузочный эффект, значения которого непрерывно меняются во времени  $t$  в результате постоянных изменений внешних факторов природного характера – ветра, волнения, дрейфующего льда и т.п. Очевидно,  $Q(t)$  следует трактовать как случайный процесс. Для упрощения дальнейшего анализа ситуации мы можем переписать неравенство (3) в виде

$$Q_j < \frac{\gamma_d}{\gamma_n} R_d, \quad j = 1, \dots, T, \quad (4)$$

где  $Q_j$  являются последовательными реализациями случайной величины (с.в.)  $Q$ :

$$Q = \max \{Q(t) \text{ в течение года} \}, \quad (5)$$

т.е.  $Q$  является максимальным значением из всей совокупности «реальных» нагрузочных эффектов, возникающих для рассматриваемой платформы в течение одного (произвольного) года. Предположим теперь (пока гипотетически), что нам известна функция распределения с.в.  $Q$ . Обозначим ее  $F_Q(x)$ . Как хорошо известно, согласно определению

$$F_Q(x) = \Pr\{Q < x\}, \quad (6)$$

где  $\Pr\{\}$  обозначает вероятность события, указанного в скобках.

Чтобы продолжить дальнейшие рассуждения, напомним важное определение термина «обеспеченность», которое характеризует нормативные и расчетные значения нагрузок и/или параметров природных воздействий. В гидрологии под обеспеченностью понимают вероятность того, что рассматриваемое значение гидрологической величины может быть превышено (сюда включается и случай равенства) среди совокупности всех возможных ее значений (см., например, [6]). Характерным

примером может служить описание параметров волн: высота волн 1%-ной обеспеченности в системе [7]. При этом в тех случаях, когда гидрологическая величина наблюдается лишь 1 раз в каждом году (например, годовой сток реки или максимальная в течение года толщина ледяного покрова), обеспеченность характеризуют числом лет, которое равно средней длине периода времени между событиями превышения значения принятой обеспеченности: например, нормативное значение скорости ветра с периодом повторяемости 50 лет, т.е. превышаемое в среднем 1 раз в 50 лет, или нормативное значение толщины стенки гололеда, превышаемое в среднем 1 раз в 5 лет (в этом случае период повторяемости составляет 5 лет) [4]. В первом из приведенных примеров обеспеченность, т.е. вероятность превышения в год, составляет  $1/50 = 0,02$ , или, что эквивалентно, 2 %, а во втором это будет  $1/5 = 0,2$ , или 20 %. Поскольку максимальное значение нагрузки того или иного вида в течение года также является случайной величиной, то понятие обеспеченности (вероятности превышения в год) применимо и к нему.

Здесь необходимо отметить, что, к сожалению, в базовом и очень важном с точки зрения методологии проектирования по предельным состояниям национальном стандарте ГОСТ 27751-2014 содержится ошибочное определение<sup>2</sup>: «2.2.6 обеспеченность: Вероятность благоприятной реализации значения переменной случайной величины. Например, для нагрузок “обеспеченность” – вероятность непревышения заданного значения; для характеристик материалов “обеспеченность” – вероятность значений, меньших или равных заданным» [2]. Помимо всего прочего, приведенное определение внутренне противоречиво, поскольку «благоприятная реализация» значения прочности – это реализация значения, большего, а не меньшего заданного. Кроме того, в том же документе применительно к материалам содержится требование: «7.2. Для материалов, прошедших приемочный контроль или сортировку, обеспеченность нормативных значений их прочностных характеристик должна быть не ниже 0,95» [2]. Если следовать таким указаниям буквально, то при проектировании сооружений прочность материалов было

бы необходимо назначать практически на уровне максимальных значений, что, конечно же, некорректно. Факт наличия ошибки в определении одного из базовых терминов в методологии проектирования усугубляется тем, что ГОСТ 27751-2014 [2] входит в доказательную базу Технического регламента о безопасности зданий и сооружений и является обязательным к применению. Остается надеяться, что в ближайшем будущем указанная ошибка будет устранена.

Возвращаясь к анализу соотношений (5) и (6), приведем элементарную оценку вероятности того, что значение  $Q_\alpha$  нагрузочного эффекта  $Q$  обеспеченностью<sup>3</sup>  $\alpha$  будет хотя бы раз достигнуто или превышено в течение предполагаемого срока эксплуатации  $T$  (для удобства обозначим искомую вероятность  $p_{\alpha,T}$ ). Во-первых, согласно определению обеспеченности, находим, что

$$\alpha = \Pr\{Q \geq Q_\alpha\} = 1 - F_Q(Q_\alpha). \quad (7)$$

Во-вторых, используя вероятность противоположного события (непревышения ни разу в течение  $T$  лет) и предполагая, что рассматриваемые годовые события независимы, находим:

$$\begin{aligned} p_{\alpha,T} &= \Pr\{Q \geq Q_\alpha \text{ хотя бы раз в течение } T \text{ лет}\} = \\ &= 1 - \Pr\{Q < Q_\alpha \text{ в каждом году из } T \text{ лет}\} = \\ &= 1 - [F_Q(Q_\alpha)]^T = 1 - (1 - \alpha)^T. \end{aligned}$$

Например, при  $\alpha = 0,01$  и  $T = 100$  лет находим  $p_{\alpha,T} = 0,634$ , т.е.<sup>4</sup> значение нагрузочного эффекта с 1%-ной обеспеченностью может быть превышено хотя бы раз в течение 100 лет с вероятностью, превышающей 0,5. Таким образом, становится ясным, что если принять при

проектировании  $Q_{1\%} \cong \frac{\gamma_d}{\gamma_n} R_d$ , то, хотя вероятность нарушения критерия проектирования (1) за период 1 года будет весьма мала – порядка 0,01, за период 100 лет она оказывается недопустимо высокой – выше 0,5.

Проведенный несложный анализ показывает, что расчетное значение нагрузочного

<sup>2</sup> Курсивом выделены некорректные формулировки. – Авт.

<sup>3</sup> Вероятность превышения в год.

<sup>4</sup> Пояснением к этому результату может служить

соотношение  $\left(1 - \frac{1}{T}\right)^T \approx \frac{1}{e} \approx 0,37$ , где  $e$  – основание

натурального логарифма, которое приближенно выполняется уже при  $T = 5$ ).

эффекта  $Q_d$  следует назначать с более низким уровнем обеспеченности, чем 1 %. Например, если принять  $\alpha = 0,001$ , то  $P_{10^{-3};100} = 0,095 \sim 0,1$ , а если  $\alpha = 10^{-4}$ , то  $P_{10^{-4};100} = 0,0095 \sim 0,01$ . Последнее значение может рассматриваться как вполне приемлемое – вероятность реализации ситуации с нарушением критерия (1) в течение всего срока службы платформы (с запасом!) составляет всего 0,01. Таким образом, приходим к выводу, что расчетное значение нагрузочного эффекта  $Q_d$  целесообразно назначать на уровне обеспеченности  $\alpha = 10^{-4}$ . Именно такие значения обеспеченности для расчетных нагрузок природного характера рекомендуются к применению при проектировании морских платформ в международном стандарте ISO 19906:2019(E) [8].

Теперь следует ответить на вопрос: что из себя представляет нагрузочный эффект? Согласно положениям отечественной методологии проектирования по предельным состояниям, значения  $Q_d$  (которые зависят от рассматриваемой расчетной ситуации и вида проверяемого предельного состояния) определяются путем составления основных ( $C_m$ ) и особых ( $C_s$ ) сочетаний нагрузок [4]. Основные сочетания нагрузок представляют собой сумму *расчетных* значений отдельных нагрузок (характеризующих рассматриваемую расчетную ситуацию), умноженных на коэффициенты сочетаний  $\psi$ :

$$C_m = P_d + (\psi_{11}P_{11} + \psi_{12}P_{12} + \dots) + (\psi_{21}P_{21} + \psi_{22}P_{22} + \dots), \quad (8)$$

где  $P_d$  – учитываемые постоянные нагрузки;  $P_{ij}$  и  $P_{ij}$  при  $i = 1, 2, \dots$  – соответственно длительные и кратковременные нагрузки. Особое сочетание включает в себя помимо вышеуказанной комбинации нагрузок дополнительно одну особую нагрузку  $P_s$ :

$$C_s = C_m + P_s. \quad (9)$$

Еще раз подчеркнем, что в выражениях (8) и (9) все нагрузки  $P$  представлены своими расчетными значениями. А с помощью коэффициентов  $\psi$ , принимающих значения, равные или меньшие 1 [4], учитывается пониженная вероятность такого события, что в период эксплуатации проектируемого сооружения несколько нагрузок разного вида одновременно достигнут своих расчетных значений. Значение

коэффициента  $\psi$  при определяющей нагрузке (для ледостойкой платформы в расчетной ситуации, отвечающей зимнему периоду времени, – это ледовая нагрузка) всегда принимается равным 1.

Напомним, что расчетное значение нагрузки в тех случаях, когда установлено ее нормативное значение, определяют умножением нормативного значения на коэффициент надежности по нагрузке  $\gamma_f$  (обычно  $> 1$ ), с помощью которого учитывается возможное отклонение реализующихся на практике значений нагрузок в неблагоприятную (большую или меньшую) сторону от их нормативных значений. Значения коэффициентов надежности по нагрузке могут быть различными для различных предельных состояний и различных расчетных ситуаций и должны устанавливаться в нормативных документах по проектированию сооружений конкретного типа.

В ГОСТ Р 58283-2018 [9] и СП 58.13330.2012 [10] указывается, что ледовые нагрузки для различных расчетных ситуаций могут рассматриваться и как основные кратковременные (а), и как особые (б), однако используются различные подходы. В государственно стандарте [9] разграничение осуществляется в зависимости от частоты реализации типа ледового явления или ледовой обстановки, характеризующих рассматриваемую расчетную ситуацию. Если ледовое явление или ледовая обстановка, трактуемые как случайные события, имеют вероятность реализации больше 0,01 (т.е. период повторяемости менее 100 лет), то при проектировании соответствующая ледовая нагрузка учитывается как основная и для нее должно быть определено нормативное значение исходя из 1%-ной обеспеченности (допускается устанавливать меньшее значение обеспеченности, но не ниже  $10^{-3}$ ). Если же вероятность реализации вышеуказанного ледового события меньше 0,01 (т.е. период повторяемости больше 100 лет), то соответствующая ледовая нагрузка должна учитываться при проектировании платформы как особая, и тогда для нее должно быть определено непосредственно расчетное значение с уровнем обеспеченности  $10^{-4}$  в типичном случае. Характерным примером 1-го рода (частое ледовое событие) служит расчетная ситуация с воздействием торосистого ледяного образования (практически на всех морских акваториях, где ледяной покров присутствует

каждый год, в его составе регулярно присутствуют торосы), нагрузка от которого поэтому должна рассматриваться в составе основного сочетания нагрузок. Характерным примером 2-го рода (редкое ледовое событие) применительно, например, к Штокмановскому месторождению в Баренцевом море является появление многолетнего льда или айсберга, нагрузки от потенциального воздействия которых должны рассматриваться как особые. Указания по значению коэффициента надежности по нагрузке для ледовых нагрузок в ГОСТ Р 58283-2018 [9] отсутствуют.

В СП 58.13330.2012 указано, что нагрузки и воздействия от льда и ледяного покрова следует рассматривать как временные (длительные и кратковременные) «при расчетных ледовых условиях» и как особые «для особых ледовых условий в акваториях морей, озер и водохранилищ» [10, Прил. Г]. К сожалению, в тексте документа отсутствуют пояснения о том, что понимается под расчетными и особыми ледовыми условиями. При этом документ содержит указание на значение коэффициента надежности по нагрузке для ледовых нагрузок – при расчетах по предельным состояниям 1-й группы его следует принимать равным  $\gamma_f = 1,1$ . Кроме того, в СП 58.13330.2012 сказано, что «в основное сочетание нагрузок и воздействий в период нормальной эксплуатации, как правило, включают кратковременные нагрузки годовой вероятностью более 0,01» [10, Прил. 1, п. 8.16]. Смысл данного предложения в приведенной формулировке неясен, поскольку нагрузка от ровного льда может быть определена как на уровне обеспеченности 0,1, так и на уровне 0,001. Возможно, авторы хотели сказать, что нормативное значение кратковременных нагрузок, учитываемых в основном сочетании нагрузок, обычно устанавливается с уровнем обеспеченности 0,01 и выше. Тогда будет иметь место примерное соответствие между названными документами [9, 10] в части требований к нормативным значениям ледовых нагрузок.

С другой стороны, в СП 38.13330.2012, регламентирующем расчет ледовых нагрузок для гидротехнических сооружений, записано следующее указание: «Ледовые нагрузки на гидротехнические сооружения должны определяться ... исходя из их ежегодной вероятности

превышения (обеспеченности), устанавливаемой в зависимости от класса сооружений по таблице 14» [7, разд. 7], а в указанной таблице морским платформам отвечает вероятность превышения  $p = 0,1$  %. Учитывая, что в документе «установлены нормативные значения нагрузок и воздействий от ветровых волн, льда и судов» [7, п. 4.1], имеет место существенное расхождение в требованиях к уровню обеспеченности ледовой нагрузки по сравнению с ГОСТ Р 58283-2018 [9] и СП 58.13330.2012 [10]. Кроме того, СП 38.13330.2012 [7] не содержит указаний по уровню обеспеченности расчетных значений особых ледовых нагрузок.

Итак, с учетом проведенного анализа действующих нормативных документов, которые должны (могут) применяться при проектировании ледостойких платформ, приходим к выводу, что, вообще говоря, расчетное значение сочетания нагрузок должно быть на уровне обеспеченности порядка  $10^{-4}$ . При этом в основное сочетание нагрузок (8) каждая учитываемая нагрузка входит в виде  $\gamma_f Q'$ , где  $Q'$  – нормативное значение, обеспеченность которого принимается для ледовых нагрузок на уровне  $\alpha \sim 0,01$ .

Что касается особого сочетания нагрузок (9), то в отечественных нормативных документах обеспеченность соответствующих расчетных значений не регламентирована. Но с учетом вышесказанного, а также того, что в особом сочетании нагрузок (9) ведущей будет нагрузка  $P_s$ , а в сочетании  $C_m$  другие ледовые нагрузки не входят (одновременно действует только один вид ледовых нагрузок, в данном случае – особая нагрузка), имеются все основания принять требуемую обеспеченность нагрузки  $P_s$  на уровне  $10^{-4}$ .

Далее рассмотрим случай нагрузки от воздействия тороса и приведем численный пример вычисления нагрузки с заданным уровнем обеспеченности. Как уже говорилось, соответствующая нагрузка в большинстве случаев оказывается определяющей при проектировании ледостойких платформ.

Обычно нагрузка от воздействия тороса ( $Q_r$ ) рассматривается как сумма нагрузок от воздействия консолидированного слоя ( $Q_c$ ) и килля ( $Q_k$ ) (см. рис. 1в):

$$Q_r = Q_c + Q_k. \quad (10)$$

Ограничимся случаем сооружения с вертикальными гранями. Для такой расчетной ситуации компоненты нагрузки от торося записываются в следующей форме [7, 8]:

$$Q_c = p_G h_c W; p_G = C_{R.c} (h_c)^n \left( \frac{W}{h_c} \right)^m; \quad (11)$$

$$Q_k = \mu h_k W \left( \frac{1}{2} h_k \mu \gamma_e + 2c \right) \left( 1 + \frac{h_k}{6W} \right), \quad (12)$$

$$n = \begin{cases} -0,50 + \frac{h_c}{5}, & \text{если } h_c < 1 \text{ м;} \\ -0,30, & \text{если } h_c \geq 1 \text{ м;} \end{cases}$$

$$\mu = \operatorname{tg} \left( 45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right);$$

$$\gamma_e = (1 - n_k)(\rho_w - \rho_i)g, \quad (13)$$

где  $h_c$ , м;  $W$  – ширина преграды, м;  $p_G$  – эффективное давление разрушающегося льда, МПа;  $C_{R.c}$  – индекс прочности льда для консолидированного слоя, МПа;  $m = -0,16$ ;  $H_k$  – осадка кия торося м;  $h_k = H_k - h_c$ , м;  $n_k$  – пористость кия;  $\rho_w$  и  $\rho_i$  – плотность воды и льда соответственно (размерность –  $10^6$  кг/м<sup>3</sup>);  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $c$  – удельное сцепление, МПа;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, град. Две последние величины являются характеристиками подводной неконсолидированной части торося, описываемой моделью сыпуче-связной среды.

При выполнении вероятностного расчета параметры  $H_k$  и  $h_c$ , обладающие наибольшей неопределенностью и статистической изменчивостью, рассматриваем как с.в., а для всех остальных принимаем номинальные детерминистические значения.

Уравнения (11), (12) описывают нагрузку на сооружение от воздействия отдельного торося при реализации механизма прорезания (рис. 2, см. а). Однако в зависимости от значений параметров торося, вообще говоря, могут иметь место различные механизмы разрушения ледяного покрова (включающего в свой состав данный торося), которые реализуются в случае остановки торося перед сооружением, – так называемый механизм «реторося», при котором разрушается не сам торося, а ровный лед, примыкающий к торося с задней стороны (см. рис. 2б–г), т.е. происходит новое торося с шириной по фронту, равной длине остановившегося перед сооружением торося.

В такой ситуации нагрузка от воздействия надвигающегося ледяного покрова, в составе которого присутствует рассматриваемый торося, будет рассчитываться по формуле, аналогичной формуле (11), но с заменой  $h_c$  на  $h_l$  – толщину ровного льда, окружающего торося,  $W$  – на длину торося  $L$ ,  $C_{R.c}$  – на индекс прочности ровного льда  $C_{R.l}$ :

$$Q_c = p'_G h_l L;$$

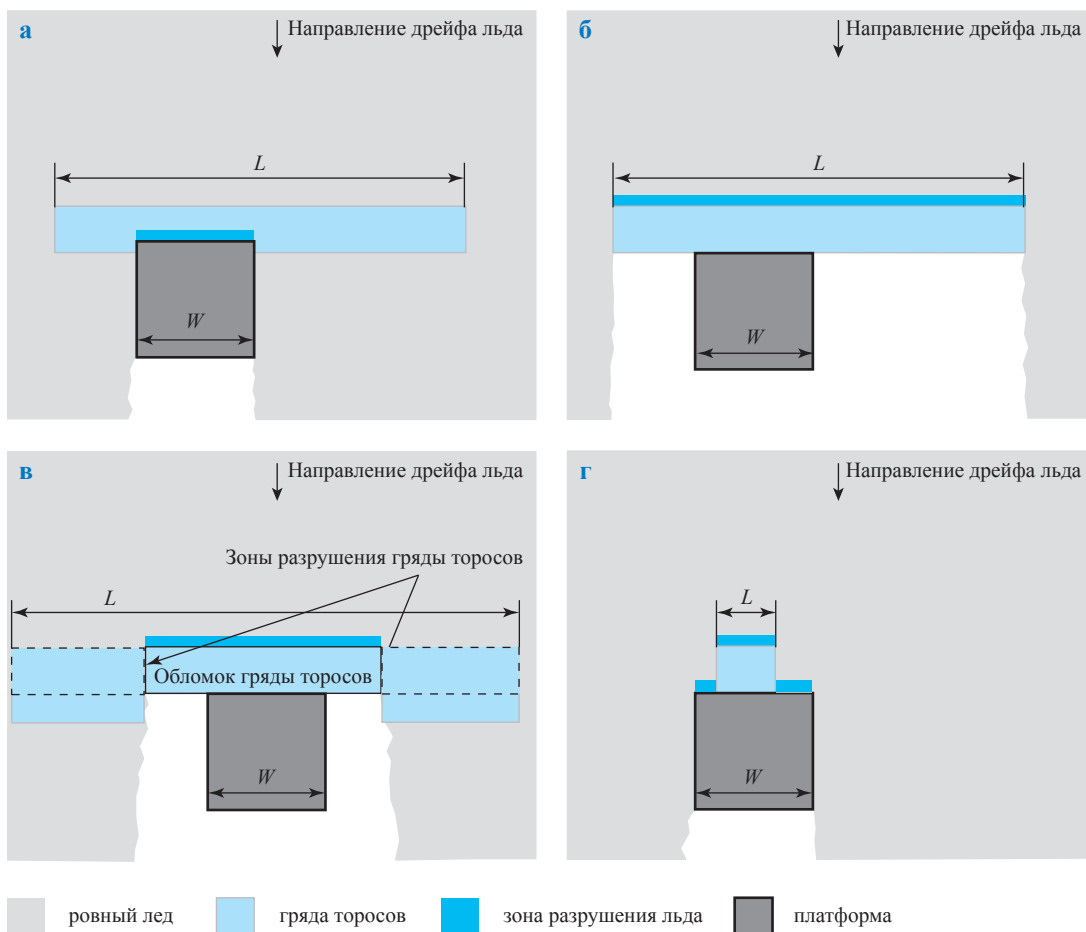
$$p'_G = C_{R.l} (h_l)^n \left( \frac{L}{h_l} \right)^m, \quad (14)$$

а в формуле (10) считаем  $Q_k = 0$ .

Кроме того, следует учесть, что в случае большой протяженности торося после его остановки перед сооружением он начинает работать в горизонтальной плоскости как балка, нагруженная поперечной нагрузкой. Очевидно, что при определенной длине свободных краев они должны обламываться. Точный анализ соответствующей задачи невозможен, в первом приближении примем, что разрушение торося происходит вследствие изгиба на расстоянии  $0,1W$  от краев сооружения (см. рис. 2в), при этом необходимо выполнить проверку критерия прочности эффективной балки на изгиб. С учетом сказанного в формуле (14) в качестве длины  $L$  должно использоваться значение, отвечающее либо исходному торося (если он относительно короткий), либо укороченному в результате разрушения. В итоге в модели нагрузки от торося добавляется еще два важных параметра – длина торося  $L$  и толщина примыкающего к торося ровного льда  $h_l$ , которые по своей природе являются случайными величинами.

Таким образом, в рассматриваемой модели нагрузка от воздействия произвольного торося  $Q_r$  описывается уравнением нагрузки, определенным соотношениями (10), (11), (12), и является функцией четырех случайных параметров  $h_l$ ,  $H_k$ ,  $h_c$  и  $L$ . Всем остальным параметрам задачи присваиваются некоторые фиксированные (номинальные) значения.

Обозначим для удобства  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)$ , где  $x_i$  – перечисленные выше с.в. Важным для корректности расчетов является вопрос о зависимости переменных. Во-первых, примем консервативное предположение, что длина торося не зависит от параметров толщины. Во-вторых, имеются основания рассматривать толщину консолидированного слоя и осадку торося взаимно независимыми с.в. [8]. В-третьих,



**Рис. 2. Различные сценарии (схемы) разрушения системы «торос – ровный лед» при взаимодействии с преградой: а – прорезание тороса без обламывания его краев; б – реторошение при остановке тороса без обламывания его краев; в – реторошение при остановке тороса с обламыванием его краев; г – реторошение при остановке короткого тороса**

предположим, что имеет место определенная корреляция между толщиной консолидированного слоя и толщиной примыкающего льда, а именно, положим

$$h_c = \xi h_l, \tag{15}$$

где  $\xi$  – случайная величина, распределенная на отрезке  $[1; \xi_{\max}]$ .

Предполагаем, что рассматриваемые с.в. описываются некоторыми заданными плотностями вероятности  $f_l(x_1), f_H(x_2), f_\xi(x_3), f_L(x_4)$  и, соответственно, функциями распределения (ф.р.)  $F_l(x_1), F_H(x_2), F_\xi(x_3), F_L(x_4)$ . Тогда, если обозначить результирующую ф.р. нагрузки от одного тороса как  $F_0(z)$ , то расчетное выражение для вероятности превышения уровня  $z$  можно записать в следующем виде:

$$\Pr\{q \geq z\} = 1 - F_0(z) = \int_{L_{\min}}^{L_{\max}} \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \int_{H_{k,\min}}^{H_{k,\max}} \int_{h_{l,\min}}^{h_{l,\max}} \chi(z; \mathbf{x}) f_l(x_1) f_H(x_2) f_\xi(x_3) f_L(x_4) dx_1 dx_2 dx_3 dx_4, \tag{16}$$

где индекс-функция  $\chi(z; \mathbf{x})$  определяется как

$$\chi(z; \mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \text{если } Q_r(\mathbf{x}) \geq z \\ 0, & \text{если } Q_r(\mathbf{x}) < z. \end{cases} \tag{17}$$

Напомним, что формула (16) позволяет рассчитывать обеспеченность нагрузки  $z$  при однократном воздействии тороса (пусть это будет  $\alpha_0$ ). Для того чтобы определить нагрузку заданной



обеспеченности в расчете на год (обозначим обеспеченность годовой нагрузки через  $\alpha_{\text{year}}$ ), необходимо учесть количество торосов ( $N_{\text{ridge}}$ ), воздействующих на сооружение в течение одного года. Очевидно, что это с.в., но для простоты примем, что это фиксированное число. Тогда можно записать для ф.р. максимальной нагрузки от торосов за один год

$$F_{\text{year}}(z) = \Pr\{q < z \text{ для всех } N_{\text{ridge}} \text{ торосов}\} = [F_0(z)]^{N_{\text{ridge}}} \quad (18)$$

и соответствующее соотношение для обеспеченностей:

$$\alpha_{\text{year}} = 1 - (1 - \alpha_0)^{N_{\text{ridge}}} \quad (19)$$

Отметим, что в случае, когда оба значения  $\alpha_{\text{year}}(z)$  и  $\alpha_0(z)$  малы по сравнению с единицей, с большой степенью точности выполняется соотношение

$$\ln(\alpha_{\text{year}}) \approx \ln(\alpha_0) + \ln(N_{\text{ridge}}), \quad (20)$$

откуда следует, что

$$\alpha_0 \approx \frac{\alpha_{\text{year}}}{N_{\text{ridge}}} \quad (21)$$

Из последнего соотношения, несмотря на его простоту, следует весьма значимый вывод: если событие воздействия на сооружение ледяных образований какого-либо вида (например, торосов) повторяется в течение года многократно, то для оценки значения годовой нагрузки с обеспеченностью  $\alpha_{\text{year}}$  необходимо определить значение нагрузки от однократного воздействия ледяного образования на уровне обеспеченности в  $N_{\text{ridge}}$  раз меньше. Если  $\alpha_{\text{year}} = 10^{-4}$  и  $N_{\text{ridge}} = 1000$ , то  $\alpha_0 = 10^{-7}$ . К обсуждению этого обескураживающего результата мы еще вернемся ниже.

Чтобы определить значение годовой нагрузки от тороса на заданном уровне обеспеченности  $\alpha_{\text{year}}$  (особый интерес представляют значения  $10^{-2}$  и  $10^{-4}$ ), необходимо вычислить 4-кратный интеграл (16) для разных значений  $z$  и воспользоваться соотношениями (18) и (19). Значение  $z$ , при котором  $\alpha_{\text{year}} = 10^{-2}$ , будет соответствовать нагрузке 1%-ной обеспеченности  $Q_{r,1\%}$ , а значение  $z$ , при котором  $\alpha_{\text{year}} = 10^{-4}$ , будет соответствовать нагрузке 0,01%-ной обеспеченности  $Q_{r,0,01\%}$ .

Вычисление интеграла (16) возможно лишь численными методами. Применение классических методов с квадратурными схемами допустимо лишь при кратности не выше 4...5. В рассматриваемом случае, когда в силу специфики задачи о вычислении малой вероятности лишь экстремально малая доля номинальной области интегрирования содержит значимую информацию (индекс-функция (17) на большей части области интегрирования равна нулю), трудности только возрастают. Универсальным способом вычисления кратных интегралов является метод Монте-Карло, однако в процессе расчетов необходим строгий контроль достижения результата с заданной точностью. В настоящей работе интеграл (16) вычислен с использованием квадратурной схемы, расчеты выполнены с помощью вычислительного пакета MathCad 14.0.

Вид распределений с.в. и часть значений констант заимствованы из технического отчета С-CORE [11], в котором представлены оценки нагрузок от тороса для центральной части Баренцева моря, полученные методом Монте-Карло. Отметим, что эти оценки [11] использовались в качестве исходных данных для ответственной процедуры «калибровки» коэффициентов сочетаний нагрузок в международном стандарте ISO 19906:2019(E) [8]. Недостающим константам значения присвоены на основе данных ISO 19906:2019(E) [8].

Приведем перечень основных данных, использованных при вычислениях интеграла (16):

- $f_l(x_1)$  – показательное распределение с параметром  $\lambda = 3,8 \text{ м}^{-1}$  и отсечками  $h_{l,\min} = 0,3 \text{ м}$  и  $h_{l,\max} = 1,5 \text{ м}$ ;
- $f_H(x_2)$  – гамма-распределение со средним значением 4,8 м, средним квадратичным отклонением (СКО) 2,3 м и отсечками  $H_{k,\min} = 2 \text{ м}$  и  $H_{k,\max} = 20 \text{ м}$ ;
- $f_\xi(x_3)$  – распределение специального вида:

$$f_\xi(x_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } x_3 < 1, x_3 > 1,9; \\ 2,469(1,9 - x_3), & \text{если } 1 \leq x_3 \leq 1,9; \end{cases}$$

- $f_L(x_2)$  – гамма-распределение со средним значением 36 м, СКО 19 м и отсечками  $L_{\min} = 0 \text{ м}$  и  $L_{\max} = 400 \text{ м}$ ;
- $W = 100 \text{ м}$ ;  $\varphi = 33^\circ$ ;  $c = 0,007 \text{ МПа}$ ;  $\rho_w = 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_i = 0,91 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;  $C_{R,c} = C_{R,t} = 2,4 \text{ МПа}$ ;  $n_k = 0,3$ ;  $N_{\text{ridge}} = 3870$ .

На рис. 3 представлены результаты расчетов (на вертикальной оси, где отложены значения обеспеченности, выбран логарифмический масштаб). Графики  $q_1$  и  $Q_1$  показывают значения обеспеченности, соответствующие различным значениям нагрузки для случая воздействия одного тороса (см. сплошную линию зеленого цвета) и для максимальной за год нагрузки от торосов (см. пунктирную линию зеленого цвета). Видно, что на участке, начинающемся примерно от значения 160 МН, второй график получен из первого путем сдвига вверх на некоторую константу (показано черной стрелкой), что в точности соответствует равенству (20).

Обращает на себя внимание, что значение нагрузки 175 МПа является вертикальной асимптотой для графиков. При этом оказывается, что для годовой нагрузки (см. график  $Q_1$  на рис. 3) это значение фактически отвечает любому уровню обеспеченности, меньшему  $10^{-3}$  (а значит, и уровню  $10^{-4}$ ), а для уровня обеспеченности  $10^{-2}$  (см. кружок зеленого цвета) нагрузка лишь немногим меньше, а именно 172 МН, что, конечно, выглядит странно.

Проверка показывает, что нагрузка  $Q_r$  при заданных исходных данных имеет максимальное значение, которое достигается при максимальных значениях всех четырех параметров модели, рассматриваемых как с.в., и равно именно 175 МН. Дополнительный анализ показывает, что, начиная с некоторого (не очень большого) значения  $L$ , этот параметр перестает влиять на результаты расчета. Тем самым

формально вероятностный расчет становится ненужным – достаточно оценить нагрузку при наибольших значениях параметров модели.

Но в таком случае возникает вопрос, а насколько корректно заданы эти максимальные значения? Очевидно, что если их увеличить, то и нагрузка станет больше. Простого ответа на этот вопрос нет. С одной стороны, понятно, что существуют физические ограничения на максимальные значения характеристик природных явлений и объектов. Но где следует установить верхнюю границу для большинства таких характеристик – неизвестно. Это одна из трудностей, с которой приходится сталкиваться при использовании вероятностного подхода для определения нормативных/расчетных значений природных нагрузок.

Продолжим анализ полученных результатов. Выполним дополнительно расчеты в предположении, что торос не обламывается при воздействии на преграду, каким бы длинным он ни был. Очевидно, что это ведет к росту нагрузок (основным становится сценарий реторошения при остановке тороса без обламывания его краев (см. рис. 2б)). Соответствующие графики  $q_{1a}$  и  $Q_{1a}$  продолжают графики  $q_1$  и  $Q_1$ , начиная со значения примерно 160 МН, в область больших значений нагрузок (эти участки показаны на рис. 3 сплошной и пунктирной фиолетовыми линиями соответственно). Аналогично вышесказанному, при  $Q_r > 160$  МН второй график получен из первого путем сдвига вверх (показано черными стрелками) в соответствии с равенством (20).

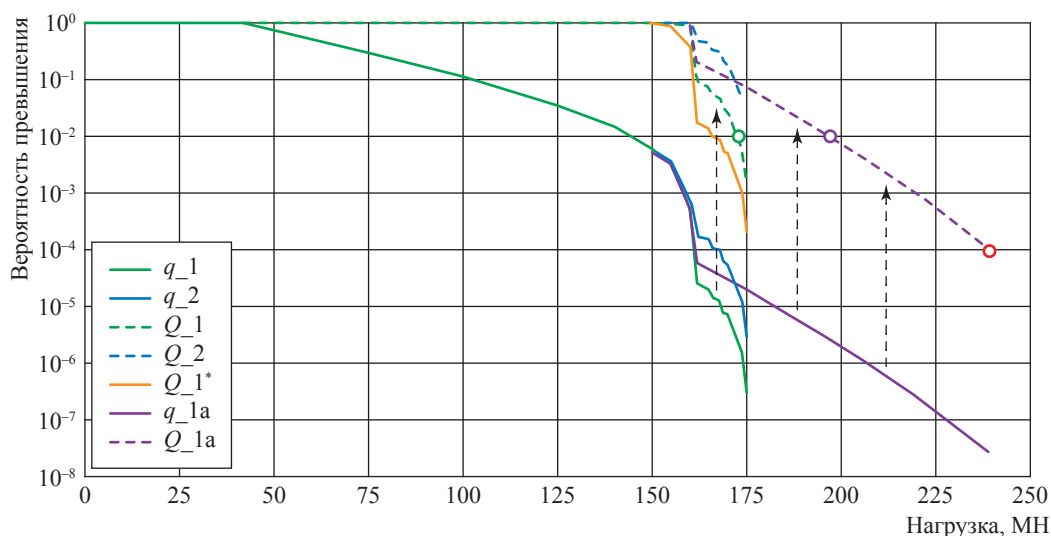


Рис. 3. Рассчитанные функции обеспеченности нагрузки от воздействия торосов

Теперь годовая нагрузка от торосов может принимать достаточно большие значения, и поиск значений нагрузки, отвечающих уровням обеспеченности  $10^{-2}$  и  $10^{-4}$ , становится оправданным. Расчеты показывают, что  $Q_{r,1\%} = 198$  МН и  $Q_{r,0,01\%} = 240$  МН (см. кружки фиолетового и красного цвета на графике  $Q_1a$ ). Интересно отметить, что при  $\gamma_f = 1,1$  находим расчетное значение нагрузки:  $1,1Q_{r,1\%} = 218$  МН, которое существенно меньше  $Q_{r,0,01\%}$  (обеспеченность значения 218 МН около 0,1 %).

Необходимо отметить, что в самом критерии обламывания краевых участков торова задействованы еще несколько параметров, характеризующих торова, помимо перечисленных ранее: его ширина в направлении по нормали к передней грани платформы, прочность консолидированного слоя торова при изгибе в горизонтальной плоскости, длина торова после обламывания краев. Все эти параметры также обладают высокой степенью неопределенности, и выбор корректных вероятностных распределений или номинальных детерминистических значений для них в свою очередь является не тривиальной задачей.

В качестве примера анализа чувствительности результатов вероятностного моделирования ледовых нагрузок рассмотрим второй вариант описания длины торова: пусть  $f_L(x_4)$  является плотностью вероятности логнормального распределения со средним значением 41,9 м, СКО 27,5 м и отсечками  $L_{\min} = 0$  м

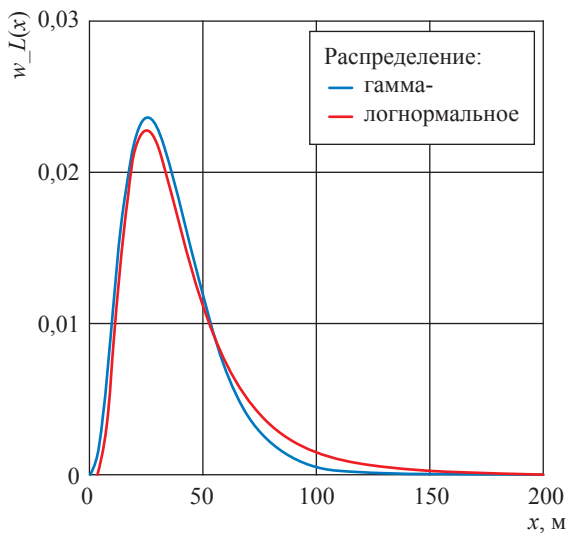


Рис. 4. Графики плотностей распределения вероятности, описывающих длину гряд торосов

и  $L_{\max} = 400$  м. На рис. 4 показаны в сопоставлении две функции плотности вероятности – исходная (гамма-распределение) и альтернативная (логнормальное распределение). Можно предположить, что на основе ограниченного объема данных, а также, учитывая, что прямолинейных гряд торосов фактически не существует, выбрать с помощью статистических процедур, какое распределение лучше описывает исходные данные в диапазоне 0...70 м, практически невозможно.

Результаты расчетов для альтернативного распределения длины торосов выполнены для случая, когда длинные торосы могут обламываться (см. рис. 3, графики синего цвета:  $q_2$  – для однократного воздействия торова,  $Q_2$  – для годовой нагрузки). Заметим, что для нагрузок, меньших 160 МН, новые графики совпадают с исходными (см. рис. 3,  $q_1$ ,  $Q_1$ ). Это объясняется тем, что относительно длинные торосы, для которых начинает сказываться расхождение в значениях плотностей вероятности, порождают нагрузки, превышающие 160 МН, а в области относительно коротких торосов плотности вероятностей для рассмотренных распределений очень близки друг к другу.

Видно, что, хотя графики  $Q_1$  и  $Q_2$  сближаются при приближении к максимально возможному значению нагрузки 175 МН, на уровне обеспеченности 0,1 (или 10 %) значения нагрузки отличаются почти на 10 МН.

Оценим теперь чувствительность получаемых результатов по отношению к количеству торосов, воздействующих на сооружение в течение года. Исходное значение равнялось  $N_{\text{ridge}} = 3870$ . Рассмотрим существенно меньшее значение  $N_{\text{ridge}} = 700$  (см. рис. 3,  $Q_1^*$ ). Как и следовало ожидать, уменьшение количества воздействующих на сооружение в течение года торосов приводит к снижению нагрузок:  $Q_{r,1\%} = 167$  МН (в расчетах использовалось исходное распределение длины торосов).

Поскольку в рамках рассматриваемой вероятностной модели обоснованное значение обеспеченности нагрузки от воздействия одного торова находится на уровне  $10^{-7}$  (вследствие того, что годовое количество торосов составляет несколько тысяч), проблема подготовки исходных данных для вероятностного моделирования начинает выглядеть как нерешаемая: получить статистическую информацию о ледяном покрове в объеме, достаточном для достоверного представления «хвостов» вероятностных

распределений в области вероятностей превышения даже  $10^{-4}$  (не говоря уже о  $10^{-7}$ ) абсолютно невозможно. Представляется, что единственным выходом из такой ситуации может служить подход, когда на каждом этапе вероятностной процедуры делаются обоснованные консервативные предположения, большая часть случайных параметров заменяется номинальными детерминистическими значениями, а для оставшихся с.в. (желательно, в количестве не больше трех-четырех) подбираются обоснованные физическими соображениями вероятностные распределения, причем в обязательном порядке выполняется анализ чувствительности полученных результатов по отношению к вариациям исходных данных.

\*\*\*

По результатам выполненного исследования могут быть сделаны следующие выводы.

1. В национальных нормативно-технических документах имеют место существенные нестыковки в вопросах определения нормативных и расчетных значений ледовых нагрузок, а также сочетаний нагрузок с участием последних.

2. Для обеспечения эксплуатационной надежности проектируемых ледостойких стационарных платформ показатель обеспеченности (вероятность превышения в течение одного года) расчетных значений ледовых нагрузок должен назначаться на уровне не ниже  $10^{-4}$ .

3. В статье приведен пример вероятностной модели, формально пригодной для расчета нагрузки от воздействия тороса на морскую платформу. Однако фактически последовательная реализация модели приводит в двум негативным результатам:

- при наличии ограничений сверху у вероятностных распределений случайных параметров, входящих в модель (например, толщины льда, осадки киля тороса, длины торосов), значение нагрузки с уровнем обеспеченности  $10^{-4}$

и ниже фактически соответствует нагрузке, рассчитанной по наибольшим значениям параметров. В такой ситуации влияние выбора уровня «отсечки сверху» на результирующее значение расчетной нагрузки становится определяющим, а вопрос оптимального выбора этих «отсечек» остается нерешенным;

- если использовать вероятностные распределения случайных параметров «без отсечек» или с таковыми, но сделанными на уровне, заведомо превышающем физически обоснованный диапазон, то применительно к задаче о нагрузках от воздействия торосов определение расчетного значения нагрузки требует нахождения нагрузки от одного тороса, соответствующей обеспеченности (вероятности превышения) порядка  $10^{-7}$ . И хотя предложенная модель формально позволяет выполнить соответствующие расчеты, результирующие значения следует рассматривать как весьма ненадежные, поскольку нет никакой гарантии, что использованные при моделировании вероятностные распределения параметров модели в области далеких «правых хвостов» (на уровне вероятности превышения  $10^{-4} \dots 10^{-7}$ ) отвечают реальной картине – объем доступных статистических данных весьма ограничен.

4. В качестве перспективного подхода к решению задачи о выборе расчетных значений ледовых нагрузок от воздействия дискретных ледяных образований, включая торосы, предлагается вариант замены большинства параметров модели номинальными значениями, определенными на достаточно консервативном уровне, с использованием для оставшихся случайных параметров (не больше трех-четырех) функций распределения без «отсечек сверху». При этом расчет должен в обязательном порядке дополняться анализом чувствительности по отношению к основным параметрам и корректировкой, в случае необходимости, полученных расчетных значений нагрузки.

## Список литературы

1. WMO sea-ice nomenclature = Номенклатура ВМО по морскому льду. – № 259. – Дополнение № 5: Linguistic equivalents. – [https://wiki.met.no/\\_media/polarprofile/products/metadatavocab/sea\\_ice\\_nomenclature.pdf](https://wiki.met.no/_media/polarprofile/products/metadatavocab/sea_ice_nomenclature.pdf)
2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.
3. СП 23.13330.2018. Основания гидротехнических сооружений.
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия.
5. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений.
6. Чеботарев А.И. Гидрологический словарь / А.И. Чеботарев. – Л.: Росгидромет, 1978.

7. СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов).
8. ISO 19906:2019(E). Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures.
9. ГОСТ Р 58283-2018. Нефтяная и газовая промышленность. Арктические операции. Учет ледовых нагрузок при проектировании морских платформ.
10. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения (с изм. № 1 от 2017 г.).
11. Development of ice design loads and criteria for various Arctic regions / C-CORE. – 2009. – Report R08-654.

## Methodological aspects of determining design loads of low exceedance level in application to ice actions on offshore structures

D.A. Onishchenko<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup> Gazprom VNIIGAZ LCC, Bld. 1, Est. 15, Proyektiruemyy proezd no. 5537, Razvilka village, Leninskiy district, Moscow Region, 142717, Russian Federation

<sup>2</sup> Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS, Bld. 1, Est. 101, prospect Vernadskogo, Moscow, 119526, Russian Federation

\* E-mail: D\_Onishchenko@vniigaz.gazprom.ru

**Abstract.** In this paper, author discusses the methodological aspects of determining the design ice loads of low exceedance level (or, equivalently, with a high return period) on the example of ridges, characteristic ice formations. The results of a comparative analysis of the normative requirements for calculating ice actions on offshore platforms contained in the main current regulatory and technical documents that should be used in the design of offshore platforms are presented. It is established that there is a certain discrepancy between the regulations in various documents, including requirements to the exceedance levels of design values of ice actions. At first glance, due to the high spatial and temporal variability of the characteristics of the ice cover that repeatedly impacts an offshore platform during the year as a result of its drift, it seems obvious that the problem of determining ice action can be correctly formulated only in a probabilistic setting, but not in a deterministic one. Since the life of an offshore platform in a typical case can be several decades, the probabilistic approach determines that the design value of the maximum action effect from the impact of a ridge on the platform for one year should be assigned at the exceedance level of  $10^{-4}$ . Given the fact that the total number of ridges impacting the platform during a year in a typical case is a few hundreds or even thousands, presented methodology leads to the conclusion that the design of offshore platforms requires to calculate the action from the single ridge impact on the exceedance level of about  $10^{-6} \dots 10^{-7}$ . Taking into account the limited amount of available field data on ridges, it is impossible to describe correctly the probability distributions of random parameters characterizing the ridge (keel draft, thickness of the consolidated layer, thickness of the level ice adjacent to the hummock, length of the ridge, ice strength, etc.) on the right “tails”, in the area of the specified values of exceedance level. At the same time, attempts to use “truncated” on the right probability distributions (in order to artificially avoid large values of the governing parameters) lead, as shown in the article on specific examples, to a situation where the value of the actions of the required low exceedance is actually calculated from the maximum values of the parameters corresponding to the “truncation” points, which is actually a deterministic approach to calculating actions. In conclusion, author discusses the question of the rational number of random parameters taken into account and the combination of probabilistic and deterministic approaches to assigning design values of ice actions.

**Keywords:** ice ridge, ice action, design value, representative value, offshore structure, exceedance level, probabilistic modelling.

### References

1. *WMO Sea-ice nomenclature*, no. 259, suppl. no. 5: Linguistic equivalents. Available from: [https://wiki.met.no/\\_media/polarprofile/products/metadatavocab/sea\\_ice\\_nomenclature.pdf](https://wiki.met.no/_media/polarprofile/products/metadatavocab/sea_ice_nomenclature.pdf)
2. GOST 27751-2014. *Reliability for constructions and foundations. General principles*. (Russ.).
3. SP 23.13330.2018. *Foundation of hydraulic structures*. (Russ.).
4. SP 20.13330.2016. *Loads and actions*. (Russ.).
5. SP 22.13330.2016. *Soil bases of buildings and structures*. (Russ.).
6. CHEBOTAREV, A.I. *Hydrologic dictionary [Gidrologicheskiy slovar]*. Leningrad: Rosgidromet, 1978. (Russ.).
7. SP 38.13330.2012. *Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships)*. (Russ.).
8. ISO 19906:2019(E). *Petroleum and natural gas industries – Arctic offshore structures*.
9. GOST R 58283-2018. *Petroleum and natural gas industries. Arctic operations. Account of ice actions in designing the offshore platforms*. (Russ.).
10. SP 58.13330.2012. *Hydraulic structures. Basic statements (amendment no. 1, 2017)*. (Russ.).
11. C-CORE. *Development of ice design loads and criteria for various Arctic regions*. 2009, report R08-654.