

УДК 621.644

Д.А. Онищенко

Вероятностный подход к оценке интенсивности ледовой экзарации в районе трасс морских трубопроводов

Ключевые слова: борозды экзарации, глубины выпахивания, донные осадки, вероятностный подход, интенсивность ледовой экзарации, морские трубопроводы.

Keywords: exaration trenches, gouging depths, bottom sediments, probabilistic approach, ice exaration rate, subsea pipelines.

Использование морских трубопроводов, которые являются безопасным и экономически эффективным способом транспортировки углеводородных ресурсов на рынки, в суровых условиях Арктического шельфа в значительной степени осложняется ледовым фактором. В частности, при проектировании арктических трубопроводов необходимо учитывать такое опасное явление, как ледовая экзарация (ледовое выпахивание) [1, 2], при котором подводные части массивных ледяных образований (торосов, стамух, айсбергов) воздействуют на морское дно и могут повреждать инженерные объекты, размещенные на дне, что приводит к необходимости заглублять трубопроводы в донный грунт. Натурные данные показывают, что донная поверхность арктических морей подвержена активному воздействию ледово-экзарационных процессов, которые визуальны проявляются в виде борозд (рис. 1). Считается, что ледовая экзарация (без учета айсбергов – соответствующий фактор в настоящей работе не рассматривается) может иметь место вплоть до глубин моря 50–60 м, при этом максимальная глубина борозд зависит от региона и может достигать 4–5 м, а ширина – нескольких десятков метров [2, 3].

С точки зрения практики важнейшим является вопрос о глубине заложения морского трубопровода на различных участках его трассы, при которой обеспечивается безопасность эксплуатации. Первые публикации на эту тему относятся к 70-м годам прошлого века, когда на шельфе Аляски и Канадского арктического архипелага были обнаружены месторождения углеводородов, а в 1978 г. там была осуществлена первая экспериментальная прокладка морского трубопровода в арктических условиях – от расположенной на глубине 55 м подводной скважины газового месторождения Дрэйк до о. Мэлвилл протяженностью 1200 м [5, 6].

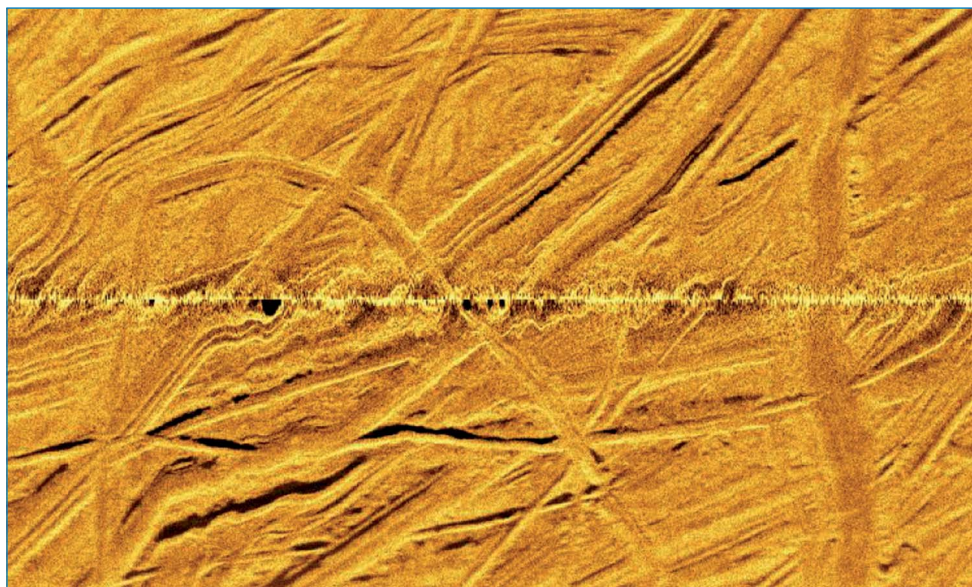


Рис. 1. Характерный пример состояния донной поверхности в районах, подверженных ледовой экзарации [4]

В последующие годы в мире было реализовано несколько проектов, в которых строительство морских трубопроводов осуществлялось с учетом фактора ледовой экзарации морского дна. Это мелководные проекты на северном шельфе Аляски в море Бофорта (трубопроводы заглублялись на 2 м) [7, 8], проекты на сахалинском шельфе (на отдельных участках глубина траншеи достигала 5 м) [9]. Отдельно необходимо отметить уникальный российский проект – подводный переход магистрального газопровода Бованенко – Ухта через Байдарацкую губу (залив Карского моря) с диаметром труб 1219 мм, рассчитанных на рабочее давление 11,8 МПа, который был введен в эксплуатацию в конце 2012 г. [10]. Длина морского участка составляет около 70 км, максимальная глубина моря – 23 м, при этом практически на всем протяжении трассы газопровода дно акватории подвержено интенсивному ледово-экзарационному воздействию [1, 11]. В недалекой перспективе морские трубопроводы будут проложены по дну Обской губы и Карского моря, где ледовая экзарация также будет являться одним из определяющих факторов (добычу газа из морских месторождений здесь планируется начать к 2020 г. и после 2025 г. соответственно [10]).

Различным аспектам проблемы влияния ледовой экзарации на проектирование морских трубопроводов (включая сбор и анализ статистических данных о количестве борозд выпавания и их размерах, определение расчетной глубины выпавания, оценку механического воздействия на заглубленный трубопровод в процессе экзарации) посвящено большое количество исследований и публикаций. Помимо указанных выше отметим, например, работы [12–17], которые, в частности, содержат достаточно подробные обзоры литературы по теме.

Настоящая работа посвящена одной из задач рассматриваемой проблемы, а именно вероятностному описанию процесса возникновения и эволюции во времени системы борозд экзарации в заданном районе, корректная постановка и решение которой позволяют определять расчетную глубину выпавания на основе полученных статистических данных.

В силу процессов переноса донных осадков и заполнения ранее возникших борозд выпавания совокупность борозд в данном районе не носит статического характера. С течением времени глубина «старых» борозд уменьшается

вплоть до полного их исчезновения, но появляются «новые» и т.д. При этом три ключевые характеристики процесса – временная интенсивность процессов экзарации (упрощенно говоря, частота возникновения борозд), механическая интенсивность (глубина выпавания) и скорость осадконакопления – должны моделироваться в рамках вероятностного подхода.

Исследователями проблемы ледовой экзарации указывалось, что исключение из рассмотрения фактора заполнения борозд осадками может приводить к существенному занижению расчетной глубины выпавания. В работах [18, 19] предложено расчетное соотношение в виде дифференциального уравнения, связывающего величины, характеризующие процесс возникновения борозд. К сожалению, из определения соответствующих величин неясно, как задать их количественное описание на основе доступных данных, а примеры расчетов в указанных публикациях отсутствуют.

Далее в статье приводится новая вероятностная модель, построение и анализ которой выполнены в терминах классической теории массового обслуживания. В модели используется ряд традиционных предположений, что позволило получить окончательный результат в аналитическом виде на основе ограниченного объема доступной статистической информации. В модели могут быть реализованы усложнения различного вида, но при этом для количественной оценки новых параметров потребуются дополнительный объем данных, которые в настоящий момент времени отсутствуют по причине недостаточной длины рядов наблюдений за процессами ледовой экзарации.

Математическая модель характеристики состояния морского дна в условиях ледовой экзарации

Рассмотрим задачу о вероятностном описании процесса ледовой экзарации применительно к проблеме оценки безопасной глубины заложения морского трубопровода.

Для упрощения описания задачи не будем выделять ледовый сезон, в течение которого возникают борозды, а условно примем, что борозды возникают случайно на протяжении всего года, который примем за базовую единицу времени. Интенсивность процесса экзарации естественно характеризовать частотой, т.е. количеством борозд, появившихся в течение года. Очевидно, что эта величина является случай-

ной, и ее конкретное значение (реализация) меняется год от года. Назовем возникновение новой борозды событием. Последовательность событий характеризуется моментами времени возникновения борозд: $t_1 < t_2 < \dots < t_n < \dots$. Математически последовательности случайных чисел описываются в рамках теории случайных процессов.

Одним из простейших вариантов случайного процесса является пуассоновский поток. Он, в частности, характеризуется тем, что для него вероятности реализации в течение интервала времени T ровно k событий вычисляются как

$$p_k = \frac{(\lambda T)^k e^{-\lambda T}}{k!}, \quad k = 0, 1, \dots, \quad (1)$$

где λ – интенсивность потока. В частности, $p_0 = e^{-\lambda T}$. Время будем измерять в годах, тогда интенсивность имеет размерность 1/год.

Известно, что вследствие природного процесса осадконакопления глубина возникшей борозды постепенно уменьшается. Этот процесс проиллюстрирован на рис. 2. Начальная глубина борозды (или глубина выпахивания) равна H . К моменту обнаружения борозды в ней накапливается определенное количество осадков. Обозначим через $h(t)$ текущую глубину борозды. Предположим, что скорость осадконакопления постоянна и одинакова для борозд различного поперечного сечения (в действительности имеется сильная зависимость от формы борозды и ее расположения, но для простоты будет рассмотрен именно такой случай). Обозначим скорость осадконакопления через w (размерность – м/год). Тогда за время ΔT толщина слоя осадков

увеличится (а глубина борозды уменьшится) на $\Delta h = w \cdot \Delta T$ (см. рис. 2).

Незасыпанную борозду будем называть активной, а борозды, полностью погребенные осадками, исключаем из рассмотрения. Тогда для активной борозды $0 < h(t) \leq H$. Как уже было сказано выше, основной вопрос при анализе данных о ледовой экзарации заключается в следующем: как по количеству обнаруженных борозд и информации о скорости осадконакопления сделать прогноз вероятности того, что в течение заданного числа лет T глубина выпахивания хотя бы в одном случае превысит заданное значение d .

Проблема содержит много факторов неопределенности, поэтому и математическая постановка задачи неоднозначна, а последующее ее решение может представлять значительные технические трудности. Покажем, что задачу, описывающую появление борозд и их постепенное заполнение осадками, в первом приближении можно математически сформулировать в терминах теории массового обслуживания (ТМО). Совокупность наблюдаемых борозд на одном произвольно выбранном участке длиной 1 км будем называть системой. «Заявкой на обслуживание» в этой системе является возникшая в результате экзарации борозда глубиной H . Виртуальным «прибором», обслуживающим поступившую в систему «заявку», является процесс осадконакопления. Длительность обслуживания заявки τ (размерность – годы) есть время полного заполнения борозды осадками (время жизни борозды), которое равно

$$\tau = H/w.$$

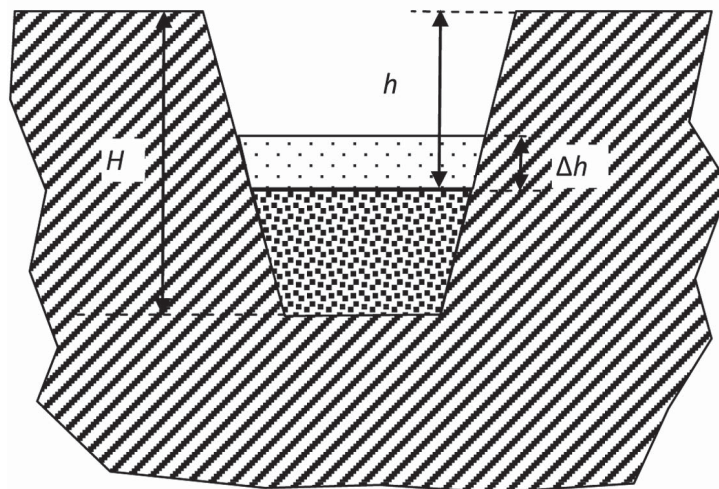


Рис. 2. Схема заполнения борозды осадками

Относительно начальной глубины выпахивания H предположим, как это часто делается в задачах ТМО [20], что она является случайной величиной и распределена по показательному закону, задаваемому, как известно, функцией распределения вида

$$F_H(x) = 1 - e^{-\eta x}, \quad (2)$$

где $\eta > 0$ – константа, обратная средней глубине выпахивания \bar{H} :

$$\bar{H} = 1 / \eta. \quad (3)$$

С учетом (3) получаем, что и длительность обслуживания описывается показательным распределением, но с измененным показателем:

$$F_\tau(x) = 1 - e^{-\mu x}, \quad (4)$$

$$\text{где } \mu \equiv 1 / \bar{\tau} = \eta w = w / \bar{H}. \quad (5)$$

Так как моменты «рождения» борозд и время их «жизни» – случайные величины, то текущее количество наблюдаемых борозд и текущее распределение их глубин представляют собой случайную картину, которая год от года претерпевает некоторые изменения. Обозначим через N текущее количество активных борозд. В соответствии с вышесказанным N является случайным числом и может принимать значения 0, 1, 2 и т.д. Обозначим через E_0, E_1, \dots возможные состояния системы, а соответствующие вероятности нахождения системы в этих состояниях в произвольный момент времени t как $P_0(t), P_1(t)$ и т.д. Очевидно, вероятности $P_k(t)$ удовлетворяют нормировочному соотношению

$$\sum_{k=0}^{\infty} P_k(t) = 1.$$

Необходимо иметь в виду, что указанные вероятности зависят от текущего момента времени и изменяются во времени некоторым сложным образом.

В соответствии с общей теорией [20], определяющие дифференциальные уравнения для величин $P_k(t)$ записываются в следующем виде:

$$\begin{cases} P_0'(t) = -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t), \\ P_k'(t) = -(\lambda + k\mu)P_k(t) + \lambda P_{k-1}(t) + (k+1)\mu P_{k+1}(t). \end{cases} \quad (6)$$

Предполагая, что процесс ледовой экзарации протекает в установившихся природных условиях, исключаем из рассмотрения аспекты временной изменчивости и ищем стационарное решение системы (6) исходя из условия установления

$$P_k'(t) \xrightarrow{t \rightarrow \infty} 0.$$

Тогда из (6) следует

$$\begin{cases} -\lambda P_0 + \mu P_1 = 0, \\ \lambda P_{k-1} - (\lambda + k\mu)P_k + (k+1)\mu P_{k+1} = 0. \end{cases} \quad (7)$$

Полученная алгебраическая система легко решается, и решение имеет вид:

$$P_0 = e^{-\rho}, \quad P_k = \frac{1}{k!} \rho^k e^{-\rho}, \quad \rho = \lambda / \mu (k = 1, 2, \dots). \quad (8)$$

Таким образом, вероятности (8) характеризуют возможность пребывания рассматриваемой системы (напомним, что в данном случае система – это совокупность борозд) в состоянии, когда имеется k активных борозд.

Из общей ТМО известно также, что при сделанных предположениях для совокупности заявок, находящихся в системе на обслуживании, время до окончания обслуживания, во-первых, не зависит от того, как долго заявки уже обслуживались, и, во-вторых, распределено по тому же показательному закону (4).

Получив решение задачи (8), можно вычислить среднее значение заявок в системе – среднее значение \bar{N} количества наблюдаемых борозд:

$$\bar{N} = \sum_{k=1}^{\infty} k P_k = \rho, \quad (9)$$

откуда с учетом (5) находим

$$\rho = \lambda / (\eta w). \quad (10)$$

Оценка интенсивности ледовой экзарации

Рассчитаем приближенные оценки соответствующих параметров, используя информацию, приведенную в [1], а также натурные данные по бороздам ледового выпаживания в Байдарацкой губе (Карское море), полученные в экспедиционных исследованиях, выполнен-

ных ФГБУ «ГОИН» в 2011–2012 гг. Процессы экзарации критически зависят от расположения исследуемого участка относительно береговой линии и от локальной батиметрии (рассматривается участок длиной 1 км) и имеют значительную пространственную неоднородность, поэтому в дальнейших расчетах используются обобщенные значения для района трассы Байдарацкого перехода (рис. 3).

Общая длина обследованного участка, расположенного на расстоянии около 2 км от коридора трассы, составляет 59 км. С учетом количества идентифицированных борозд $n = 657$ среднее число активных борозд на 1 км равно $n = 657/59 = 11,1 \text{ км}^{-1}$, что может быть принято за оценку параметра $\rho = \bar{N}$ (10).

Временная интенсивность процесса экзарации оценивается количеством новых борозд, возникших в течение одного года:

$$\lambda \approx 14/59 = 0,24 \cdot (\text{км} \cdot \text{год})^{-1}. \quad (11)$$

Отметим, что корректные оценки параметра λ для конкретного района могут быть получены только на основе повторных наблюдений на одних и тех же профилях съемки дна. Российский опыт в этой части крайне ограничен [11], в то время как соответствующие исследования, например в море Бофорта, ведутся уже на протяжении не одного десятилетия [3, 13].



Рис. 3. Район трассы морского перехода через Байдарацкую губу

Оценка скорости осадконакопления

Для оценки скорости осадконакопления (заносимости) в ходе экспедиций ФГБУ «ГОИН» 2011 г. на дне Байдарацкой губы были установлены осадкосборные лотки. Согласно полученным данным, мощность накопленного неконсолидированного осадка в среднем составила 7 мм.

В то же время, согласно [21], мощность морских голоценовых осадков в этом регионе составляет от 0,1 до 3–5 м. Принимая, что современный уровень моря установился около 8–5 тыс. лет назад, скорость осадконакопления составит в среднем 0,4 мм/год, что более чем на порядок ниже скорости накопления, полученной в процессе эксперимента. В силу неопределенности данного фактора в расчетах рассмотрим значения w в диапазоне от 0,2 до 8 мм/год.

Расчетные оценки параметров экзарации

Получим оценки для средней глубины выпахивания \bar{H} (табл. 1).

Теперь в предположении, что построенная модель удовлетворительно описывает процесс экзарации, найдем вероятность $P_T(\delta)$ того, что в течение срока эксплуатации трубопровода T хотя бы раз глубина экзарации на участке трубопровода длиной $L = 1$ превысит заданное

значение δ . Удобнее вычислить дополнительную вероятность $\bar{P}_T(\delta) = 1 - P_T(\delta)$ – вероятность того, что за T лет глубина ни одной борозды не превысит значения δ . Воспользуемся формулой полной вероятности, в которую подставим вероятность (1) реализации ровно k борозд:

$$\bar{P}_T(\delta) = \sum_{k=0}^{\infty} p_k [F_H(\delta)]^k = e^{-\lambda T(1-F_H(\delta))} = e^{-\lambda T e^{-\delta/\bar{H}}}, \quad (12)$$

тогда

$$P_T(\delta) = 1 - e^{-\lambda T e^{-\delta/\bar{H}}}.$$

Рассмотрим значения δ в диапазоне от 0 до 3,5 м. Расчет выполним для значений скорости осадконакопления w , приведенных в табл. 1. Результаты представлены в табл. 2.

Выполним далее оценку вероятности превышения глубины выпахивания δ для трубопровода в целом, т.е. для $L = 59$ км. Рассматривая протяженный трубопровод как систему последовательных участков длины $L = 1$ км и трактуя событие превышения глубины δ при экзарации как отказ, вычисляем искомую вероятность как вероятность отказа системы из L последовательно соединенных элементов:

$$P_{T,L}(\delta) = 1 - [\bar{P}_T(\delta)]^L = 1 - e^{-\lambda T L e^{-\delta/\bar{H}}}. \quad (13)$$

Таблица 1

Результаты расчетов средней глубины выпахивания

| Скорость осадконакопления w , м/год | Кол-во борозд $\rho \approx n$, км ⁻¹ | Параметр функции распределения глубины выпахивания $\eta = \lambda/(w\rho)$, м ⁻¹ (10) | Средняя глубина выпахивания $\bar{H} = 1/\eta$, м (3) |
|---------------------------------------|---|--|--|
| $0,2 \cdot 10^{-3}$ | 11,1 | 108 | 0,00925 |
| $1,0 \cdot 10^{-3}$ | 11,1 | 21,6 | 0,0463 |
| $5 \cdot 10^{-3}$ | 11,1 | 4,32 | 0,231 |
| $8 \cdot 10^{-3}$ | 11,1 | 2,70 | 0,370 |

Таблица 2

Вероятности $P_T(\delta)$ появления за $T = 25$ лет борозды, глубина которой превышает заданное значение δ (в расчете на 1 пог. км)

| Заданная глубина выпахивания δ , м | Скорость осадконакопления w , м/год | | | |
|---|---------------------------------------|----------------------|----------------------|---------------------|
| | $0,2 \cdot 10^{-3}$ | $1,0 \cdot 10^{-3}$ | $5,0 \cdot 10^{-3}$ | $8,0 \cdot 10^{-3}$ |
| 0 | 0,9975 | 0,9975 | 0,9975 | 0,9975 |
| 0,5 | – * | 0,000121 | 0,499 | 0,788 |
| 1 | – * | $2,4 \cdot 10^{-09}$ | 0,0763 | 0,331 |
| 1,5 | – * | $4,9 \cdot 10^{-14}$ | 0,00910 | 0,0989 |
| 2 | – * | 0 | 0,00105 | 0,0266 |
| 2,5 | – * | 0 | 0,000121 | 0,00695 |
| 3 | – * | 0 | $1,4 \cdot 10^{-05}$ | 0,00180 |
| 3,5 | – * | 0 | $1,6 \cdot 10^{-06}$ | 0,00047 |

* Вероятность меньше $1 \cdot 10^{-14}$.

На рис. 4 приведены графики величин $P_{T,L}(\delta)$ для различных значений скорости осадконакопления w . Видно, что результирующие значения обладают высокой чувствительностью по отношению к значению w : например, принимая приемлемый уровень надежности трубопровода в целом за весь период эксплуатации как 5 %, находим, что необходимая глубина заложения трубопровода составляет $\Delta = 0,4; 2,0$ и $3,25$ м соответственно для $w = 1, 5$ и 8 мм/год. Заметим, что значения Δ приведены без учета фактора опасного воздействия деформаций в массиве грунта ниже киля ледяного образования, осуществляющего экзарацию (при учете данного фактора может потребоваться дополнительное заглубление на величину порядка $0,5-1,0$ м (см., например, [2, 22, 23]).

Таким образом, из предварительных результатов расчетов следует, что безопасная глубина заложения газопровода лежит в диапазоне $2-3,5$ м. После полной статистической обработки данных по экзарации и получения более определенных данных по скорости за-

носимости борозд осадками с помощью предложенной методики могут быть получены более точные оценки для безопасной глубины заложения трубы.

Изложенная методика оценки расчетной глубины выпаживания при ледовой экзарации допускает дальнейшую детализацию в части учета изменчивости параметров ледовой экзарации от одного участка трассы к другому (разные частота выпаживания, вероятностные распределения глубины выпаживания, скорость осадконакопления, свойства грунтов и др.). В частности, из общей теории следует, что предположение о показательном распределении глубины выпаживания H (2) может быть исключено [2]. В то же время для реализации других модификаций модели требуется существенно больший объем исходных данных, возрастают требования к их точности (достоверности), и поэтому в настоящее время применение более детального подхода представляется нецелесообразным.

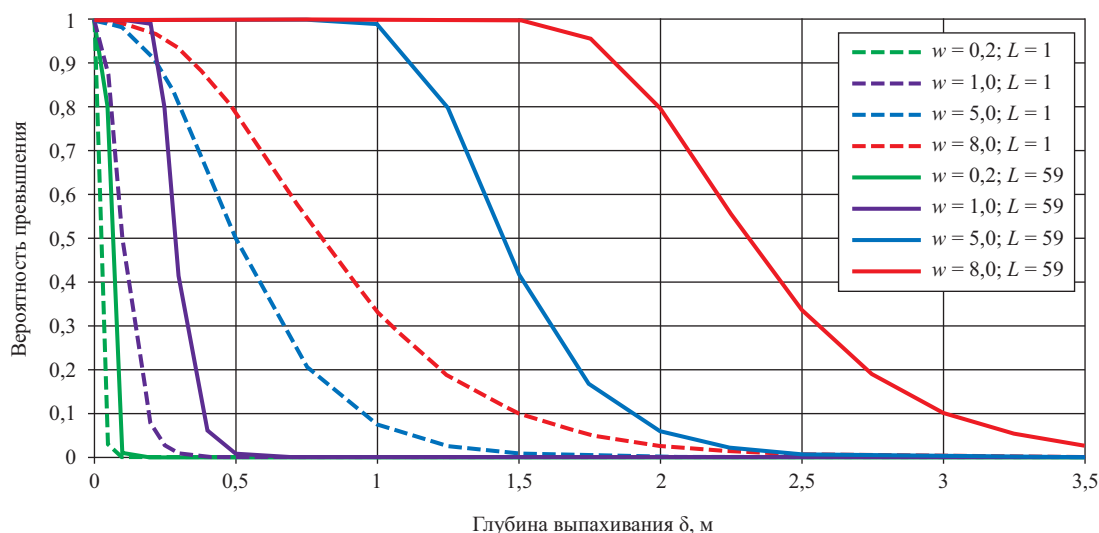


Рис. 4. Оценка вероятности повреждения одной нитки морского перехода через Байдарацкую губу вследствие ледовой экзарации дна при различной скорости осадконакопления

Список литературы

1. Природные условия Байдарацкой губы. Основные результаты исследований для строительства подводного перехода системы магистральных газопроводов Ямал – Центр / под ред. Г.И. Дубикова, В.А. Совершаева и В.С. Тужилкина. – М.: ГЕОС, 1997. – 432 с.
2. Weeks W.F. Ice-induced gouging of the seafloor. In: Encyclopedia of Ocean Sciences / W.F. Weeks. – London: Academic Press, 2001. – P. 1265–1200.
3. Design Options for Offshore Pipelines in the US Beaufort and Chukchi Seas // C-CORE Report R-07-078-519. – V. 2.0. – April 2008.

4. Ice Gouging: Identification and Analysis // Arctic Technologies Workshop. – October 2009. – www.fugro.com
5. Brown R.J. Engineering innovation for subsea pipe line connections / R.J. Brown. – Pipe Line Industry, July 1978. – P. 47–51.
6. Palmer A.C. Design and installation of an offshore flowline for the Canadian Arctic islands / A.C. Palmer, D.J. Baudais, D.M. Masterson // Proc. 11th Annual OTC. – Houston, USA, 1979. – P. 765–772.
7. Braden A. First Arctic Subsea Pipelines Moving to Reality / A. Braden, V. Manikian, D. Rice et. al // Proc. Offshore Technology Conference. – Houston, USA, 1998. – P. 425–434.
8. Leidersdorf C.B. Coastal Engineering Design of the Oooguruk Project / C.B. Leidersdorf, P.E. Gadd, G.E. Hearon et. al // Proc. Offshore Technology Conference. – Houston, USA, 2008. – 17 p.
9. Athmer J. Dredging, trenching and rock placement works for the Sakhalin-1 project, Russian Far East / J. Athmer, T. Gijzel // Terra et Aqua. – December 2006. – № 105. – P. 3–17.
10. Расширяем географию: Интервью с заместителем Председателя Правления ОАО «Газпром» В. Маркеловым // Газпром. – 2013. – № 4. – С. 14–19.
11. Гафаров Н.А. Новые направления исследований для обеспечения проектирования газодобывающих и газотранспортных объектов на акваториях, примыкающих к полуострову Ямал / Н.А. Гафаров, Ю.В. Илатовский, Д.А. Онищенко и др. // Освоение ресурсов нефти и газа российского шельфа: Арктика и Дальний Восток (ROOGD-2012). – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – С. 19–30.
12. Proceedings of 2nd Ice Scour & Arctic Marine Pipelines Workshop. – Mombetsu, Japan, 2000. – 278 p.
13. Barnes P.W. Ice gouging characteristics and processes / P.W. Barnes, D.M. Rearic, E. Reimnitzin (eds) // The Alaskan Beaufort Sea: Ecosystems and Environments. – Orlando: Academic Press, 1984. – P. 185–212.
14. Marchenko A.V. Ice gouging in the Baydaratskaya Bay: Field studies and numerical simulations. Recent development of Offshore Engineering in Cold Regions / A.V. Marchenko, S.A. Ogorodov, A.V. Shestov et. al // Yue (ed), POAC-07. – June 27–30, 2007. – Dalian: Dalian University Press. – P. 747–759.
15. Paulin M.J. Offshore Pipelines in Cold Regions – Environmental Loadings & Geotechnical Considerations / M.J. Paulin, S.P. Kenny, A.C. Palmer et. al // Proc. 8th International Conference ICETECH. – Banff, Alberta, Canada, 2008. – Paper No. ICETECH08-176-RF. – 8 p.
16. Palmer A.C. Are we ready to construct submarine pipelines in the Arctic? / A.C. Palmer // Proc. Arctic Technology Conference. – Houston, Texas, USA, 2000. – Paper OTC 12183. – 8 p.
17. El-Gebaly S. Ice Gouge Interaction with Buried Pipelines Assessment Using Advanced Coupled Eulerian Lagrangian / S. El-Gebaly, M. Paulin, G. Lanan et. al // Proc. Arctic Technology Conference. – Houston, Texas, USA, 2012. – Paper OTC 23764. – 12 p.
18. Palmer A.C. Ice gouging and pipelines: Unresolved questions / A.C. Palmer, A.W. Niedoroda // Proc POAC. – 2005. – V. 1. – P. 11–21.
19. Kenny S. Design Challenges for Offshore Pipelines in Arctic Environments / S. Kenny, A.C. Palmer, K. Been // Exploration & Production – Oil & Gas Review. – 2008. – V. 6. – Iss. II. – P. 108–115.
20. Гнеденко Б.В. Введение в теорию массового обслуживания / Б.В. Гнеденко, И.Н. Коваленко. – М.: Наука, 1987. – 336 с.
21. Рокос С.И. Газонасыщенные осадки губ и заливов южной части Карского моря / С.И. Рокос, Г.А. Тарасов // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода. – 2007. – № 67. – С. 66–75.
22. Palmer A.C. Ice gouging and the safety of marine pipelines / A.C. Palmer, I. Konuk, G. Comfort et. al // Offshore Technology Conference. – Paper 6371. – P. 235–244.
23. Наумов М.А. Параметрический анализ воздействия ледовой экзарации на заглубленный трубопровод / Н.А. Наумов // Вести газовой науки: Современные подходы и перспективные технологии в проектах освоения нефтегазовых месторождений российского шельфа. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – № 3 (14). – С. 141–149.