

УДК 551.46+532.321+504.6

© И. С. Ковчин¹, А. И. Степанюк²

¹Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, г. Москва

²Арктический и антарктический научно-исследовательский институт (АНИИ), г. Санкт-Петербург
e-mail

К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ НЕБЛАГОПРИЯТНЫХ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ НА СТРОИТЕЛЬСТВО МОРСКИХ ТРУБОПРОВОДОВ

Статья поступила в редакцию 01.02.2017, после доработки 23.09.2017.

Статья посвящена разработке методического подхода к оценке рисков при строительстве и последующей эксплуатации морской части трубопроводов, связанных с проявлением природных и техногенных факторов. Методика исследований включает анализ данных о природной среде и климате регионов строительства морской части известных трубопроводов с учётом технологии их строительства и оценку влияния природных факторов на возможность возникновения нештатных ситуаций. Влияние неблагоприятных событий на процесс строительства описывается в терминах среднегодовых значений вероятности опасных явлений и времени задержки процесса трубоукладки с учётом критических ограничений функционирования трубоукладочных судов различного класса. Рассматриваются ситуации, приводящие к простоям при трубоукладке при неточном прогнозе штормовых условий. На основе разработанного подхода был выполнен расчет вероятностей для оценки факторов при укладке трубопроводов по предполагаемым маршрутам по дну Черного моря и возможных потерь времени от изменений погодных условий.

Ключевые слова: Чёрное море, морской трубопровод, трубоукладка, шторм, волнение, обледенение, геориск.

I. S. Kovchin¹, A. I. Stepanuk²

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

²State Research Center "Arctic and Antarctic Research Institute", St.-Petersburg

NOTE ON THE ESTIMATION OF THE INFLUENCE OF THE UNFAVORABLE NATURAL FACTORS ON THE MARINE PIPELINES CONSTRUCTION

Received 01.02.2017, in final form 23.09.2017.

The paper is devoted to the development of a methodical approach to risk assessment in the construction and subsequent operation of the offshore part of pipelines associated with the manifestation of natural and other factors. The research methodology includes analysis of data on the environment and climate of the regions of the construction of the offshore part of known pipelines, taking into account the technology of their construction and the influence of natural factors on the possibility of occurrence of trouble situations. The influence of unfavorable events on the construction process is described in terms of the average annual probability of hazardous phenomena and the delay in the process of pipe laying using the critical limitations of the operation of pipelaying vessels of various classes. Situations that lead to downtime construction with an inaccurate forecast of storm conditions are considered. Based on the developed approach, a calculation of the probabilities for estimating the factors during the laying of pipelines along the proposed routes in the Black Sea and possible losses of time from changes in weather conditions was performed.

Key words: Black Sea, offshore pipeline construction, storm, wind wave, ship icing, risk.

Ссылка для цитирования: Ковчин И. С., Степанюк А. И. К оценке влияния неблагоприятных природных факторов на строительство морских трубопроводов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 80—84.

For citation: Kovchin I. S., Stepanuk A. I. Note on the estimation of the influence of the unfavorable natural factors on the marine pipelines construction. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2018, 11, 1, 80—84.

DOI: 10.7868/S2073667318010094

В Российской Федерации и за рубежом ведется активное строительство морских трубопроводных систем для транспортировки углеводородного сырья. При этом совершенствуются технологии трубоукладки, расширяется география строек и эксплуатируемых систем. В настоящее время у нас в стране уже сооружаются или планируется к строительству морские трубопроводы (МТ) в акваториях Черного и Балтийского морей, а также в арктических морях. Однако в связи с недостаточным учетом природных факторов затраты на их строительство не могут быть оптимизированы. Это обуславливает актуальность разработки методологического подхода к оценке возможных георисков при сооружении и последующей эксплуатации подводных трубопроводов. Под риском понимается качественная или количественная вероятность проявления случайного или незапланированного события, рассматриваемая в связи с потенциальными последствиями отказа. В количественном определении риск — это дискретная вероятность определенного отказа, умноженная на его дискретные последствия [1]. Применительно к теме исследования геориски — это совокупность вероятных значений природных факторов и ущерба от них, в результате воздействия которых на трубоукладочное судно (ТУС) и/или на трубопровод в ходе прокладки, в конструкциях могут создаваться нагрузки, превышающие допустимые проектом, вплоть до разрушения.

В статье обоснован подход к оценке рисков для трубоукладки, вызванных опасными гидрометеорологическими явлениями (ОЯ) и неблагоприятными факторами. На основе предложенной методики получены отдельные численные оценки гидрометеорологических рисков при строительстве МТ в акватории Чёрного моря.

При глубоководной прокладке подводных трубопроводов работы выполняются с помощью специально оборудованного ТУС. На его борту осуществляется хранение труб, их сварка и укладка на морское дно. Современные ТУС оснащены системой динамического позиционирования и способны оперативно реагировать на изменения погодных условий, однако все они рассчитаны на работу при вполне определенных гидрометеорологических условиях [2, 3]. Поэтому ситуации, когда величины течений, ветра и волнения превышают предельные параметры по техническим характеристикам судов, будут в данной работе рассматриваться как обуславливающие геориски. В частности, известные ТУС «S7000» (Saipem) и «Balder» имеют ограничения по волнению высотой 6 м (5—6 баллов), ТУС Solitaire — 2.5 м (до 4 баллов), а предельные значения по ветру для этих судов не превышают 14 и 11 м/с соответственно [3]. При таких критических гидрометеорологических явлениях ТУС невозможно удержать на маршруте с помощью системы стабилизации, а нагрузки на вывешенную за бортом трубу превысят ее прочностные характеристики. В случае ожидания такого шторма по прогнозу укладка трубы прекращается, экипаж опускает свободный конец трубы на дно на тросе и ждет окончания шторма. Однако при недостоверном прогнозе экипаж либо не успеет до начала шторма выполнить весь комплекс работ по консервации трубы, либо штормовые условия не будут наблюдаться, или параметры ОЯ не достигнут предельных значений. В первом случае, часть трубопровода может оказаться за бортом, и система судно-труба будет испытывать нагрузки близкие к критическим, что может вызвать аварию, а во втором — будут иметь место дополнительные потери времени.

Для оценки риска возникновения нештатных или аварийных ситуаций на морском трубопроводе, вызванных этими природными явлениями, предложено использовать вероятностный подход [4, 5]. При этом сам геориск определяется вероятностью возникновения нештатной ситуации на ТУС, а возможный ущерб оценивается во временных потерях. Применительно к морской части трубопроводов под этим понимаются все задержки процесса укладки трубопровода в связи с неблагоприятными погодными условиями или ОЯ.

Из общих положений теории вероятностей известно, что для k независимых факторов (или групп факторов) риска, имеющих собственные вероятности p_i , ($i = 1, k$) общий интегральный риск P вычисляется по формуле

$$P = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - p_i).$$

Большинство внешних природных воздействий для каждого из факторов подчиняются закону распределения Пуассона. Следовательно, вероятность $P(t)$ того, что за время событие произойдет, хотя бы раз, может быть оценена по следующей формуле:

$$P(t) = 1 - \exp(-vt),$$

где ν — средняя интенсивность (частота) предсказываемых природных воздействий в год, причём среднее время в часах между событиями определяется как $T = 365 \cdot 24 / \nu$.

На практике для оценки средней вероятности геориска можно ограничиться более простым соотношением вида:

$$p = \frac{\nu E\tau}{365 \cdot 24}, \quad (1)$$

где $E\tau$ — математическое ожидание продолжительности события в часах.

Для оценки потерь времени от ОЯ в процессе укладки МТ при условии, что рабочий процесс ведётся круглый год, можно пользоваться соответствующими среднегодовыми частотами ν . При своевременном штормовом или ледовом предупреждении теряется время только на период неблагоприятного события. Но при ложном предупреждении, т. е. при ошибочном прогнозе, прекращение работ оказывается неоправданной задержкой рабочего процесса. Тогда, время задержки процесса укладки трубы можно оценить математическим ожиданием вида

$$E\tau_0 = E\mu[(1 - p_w)E\tau_s + p_w(E\tau_s + E\tau_r)], \quad (2)$$

где p_w — вероятность аварии в процессе консервации трубы при неожиданном шторме; $E\tau_s$ — средняя продолжительность шторма; $E\tau_r$ — средняя продолжительность ремонтных работ в случае аварии; $E\mu$ — математическое ожидание числа штормов, причём $E\mu = \nu t$.

Если пренебрегать вероятностью аварий, то величину $E\tau_0$ ожидаемой задержки процесса укладки трубы можно оценить по формуле

$$E\tau_0 = E\mu \cdot E\tau_s. \quad (3)$$

На основе изложенного подхода можно выполнить расчет вероятностей для оценки факторов риска ОЯ по предполагаемым маршрутам строительства МТ по дну Черного моря и возможных потерь времени при их укладке на морское дно от неблагоприятных погодных условий. Примеры отдельных расчетов годовой вероятности риска и возможного времени простоя при морской трубоукладке для различных ТУС приведены ниже.

Чтобы оценить ожидаемые потери времени $E\tau_0$ при штормовых ситуациях в Черном море необходимо иметь данные о статистике штормов и сопутствующих ОЯ для районов, прилегающих к маршруту прокладки МТ. Если рассматривать диапазон скорости ветра от 10 до 20 м/с, то в соответствии со шкалой Бофорта такому ветру могут быть поставлены в соответствие высоты волн h в весьма широком диапазоне — от 2 до 6 м. Это означает, что временной ущерб, наносимый штормами при максимально большой высоте волн 6 м, становится критическим, практически для всех рассматриваемых ТУС. Климатические статистические данные о повторяемости и продолжительности штормов на Чёрном море заметно разнятся для различных районов и периода анализа. Так, например, результаты анализа статистического материала за 15 лет (1954—1968 гг.) указывали, что в северных районах моря в среднем за год отмечалось 44—57 случаев сильных и штормовых ветров (>10 м/с), в юго-восточных районах — 15—17 [6]. Наибольшее число часов с сильным ветром приходится на северный и северо-западный районы (в среднем более 1000—1200 ч в год), что даёт среднегодовую продолжительность шторма около 22 ч. Последующее уточнение за период 1978—1983 гг. показало, что во все годы штормовая деятельность была интенсивнее средних норм. В частности, из [7] можно получить оценку длительности сильных штормов до 2.5 сут или 60 ч в зависимости от района моря. Иная оценка продолжительности штормов (до 24 ч) для северо-восточной части моря дается в работе [8] по результатам анализа за 1996—2003 гг. В работе [9] приводятся данные о средней суммарной годовой продолжительности штормов порядка 50—60 дней в болгарском секторе моря. Из нее следует также, что за 6 лет наблюдалось 70 сильных шторма, что даёт среднюю продолжительность шторма порядка 4.7 сут или 113 ч при средней частоте порядка 12 штормов в год. В исследовании [10], опиравшемся на результаты анализа данных за 1948—2010 гг., указываются значения количества и средней продолжительности штормов за год для всего моря: 95 случаев и 53.87 ч, соответственно, при высотах волн более 4 м. Отмечается, что в среднем наблюдалось только два шторма в год продолжительностью 81 ч при значительной высоте волны более 6 м.

На основе рассмотренных статистических гидрометеорологических данных по открытым районам Чёрного моря можно принять для районов прокладки МТ среднюю частоту и среднюю продолжительность

сильных штормов равными 12 случаев в год и 50 ч, соответственно. Тогда из выражения (1) следует, что вероятность прерываний работ штормами для всех рассматриваемых судов составит около 6.85 %. Если исходить из планируемой годовой продолжительности работ по укладке МТ и при этом не использовать штормовые прогнозы, то временные задержки без учета аварийных ситуаций (2) не должны превысить 600 ч или 25 сут с равной для указанных ТУС вероятностью возникновения геориска нештатной ситуации около 6.85 %.

Однако при анализе архивных данных по гидрометеорологическим условиям Черного моря можно видеть, что критические для ТУС значения ветра и волнения наблюдаются не только, когда обстановка обозначается как штормовая. Согласно [7] в западном, северном и северо-восточном регионах максимальная высота волн более 2.5 м (критичных для ТУС «Solitaire») будет наблюдаться с вероятностью p примерно 50 % в год, а более 6 м — 2 % в год. Отсюда ожидаемые временные потери $E\tau_0$ при расчетах по формуле, вытекающей из (3), с учетом (1):

$$E\tau_0 = pt,$$

могут составить величину 182 сут для ТУС «Solitaire», и 7.4 сут — для ТУС S7000 и «Balder».

Из данного примера видно, что ожидаемый временной ущерб, наносимый только штормами, в зависимости от возможностей используемых трубоукладочных судов и волно — ветровых характеристик может меняться в диапазоне от 2 до 50 % потерь времени по сравнению с запланированным графиком работ по проекту.

Оценка риска остановки прокладочных работ при обледенении судов также встречает определенные трудности из-за недостаточной информации об интенсивности и продолжительности этого ОЯ для открытых районов Черного моря. Согласно сведениям, приведенным в [11], месячная повторяемость различных типов обледенения может достигать 10 % в отдельных местах их регистрации. В то же время по архивным данным [6] обледенение имеет место преимущественно в северо-западной и северо-восточной частях Черного моря с ноября по апрель и протекает на широком гидрометеорологическом фоне. Так, средняя (по различным диапазонам температуры воздуха) интенсивность ОЯ составляла $v = 71$ при 20 % годовой повторяемости, а средние (по различным диапазонам температуры воды) интенсивность и повторяемость — $v = 26$ и 7 %, соответственно. Поскольку обледенение может наступать только в зимнюю половину года, то при среднегодовой частоте $v = 60$ средний период ожидания очередного обледенения ТУС будет составлять не менее трех суток, что не только сильно затруднит работы в море, но будет чревато авариями и несчастными случаями с людьми.

Таким образом, в статье предложен методический подход для получения численных вероятностных оценок возможных нештатных ситуаций, возникающих в процессе строительства морского трубопровода, который можно использовать при проектировании аналогичных объектов. Установлено, что при морской трубоукладке основные геориски, способные вызвать нештатные или даже аварийные ситуации, связаны с невозможностью получения достоверного прогноза опасных погодных явлений по трассе строительства, а их значения существенно зависят от характеристик ТУС. Практическая значимость результатов работы заключается в возможности получения объективной информации об источниках возможных георисков и их вероятностных характеристиках, используя справочные данные о природных процессах в районе предполагаемого строительства.

Литература

1. Морской стандарт DNV-OS-F101. Подводные трубопроводные системы / СТО Газпром 2-3.7-050-2006. М.: Газпром, 2006. 453 с.
2. Ковчин И. С., Степанюк А. И. Современные технологии гидрометеорологического обеспечения морских портов и месторождений углеводородного сырья // Тр. Международного симпозиума «Инновационные технологии в исследовании окружающей среды» RE:2013. Ларнака, Кипр 13—17 мая 2013 г. С. 43—45.
3. Серебряков А. М., Русинов Л. А., Блинков А. Н. Поддержка принятия решений в нештатных ситуациях при строительстве морских трубопроводов. СПб.: Наука, 2015. 223 с.
4. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. Т.1., Т.2. / Пер. с англ. М.: Мир, 1984.
5. Куракин А. Л., Лобковский Л. И. Экономическая оптимизация требований к системам геоэкологического мониторинга // Доклады Академии наук. 2012. Т. 446, № 1. С. 86—88.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. А. И. Симонова, Э. Н. Альтмана. СПб.: Гидрометиздат, 1991. 430 с.

7. Лопатухин Л. И., Бухановский А. В., Иванов С. В., Чернышева Е. С. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей, 2006. Российский Морской Регистр Судоходства. Санкт-Петербург, 2006. 452 с.
8. Дивинский Б. В., Пушкарев О. В. Экстремальные волны в северо-восточной части Чёрного моря // Вестник южного научного центра РАН. 2007. Т. 3, № 1. С. 22—27.
9. Гроздев Д. Статистическая структура на вятъра и ветровото вълнение при щормови условия в синоптична станция Емине // Тр. на Инст. по океанология. 2005. Т. 5. С. 81—90.
10. Гиппиус Ф. Н., Архипкин В. С., Суркова Г. В. Оценка современных характеристик и многолетней изменчивости экстремального волнения на Черном море // Экологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: Зб. наук. пр. Севастополь, 2013. Вип. 27. С. 92—96.
11. Суханов С. И., Лавренов И. В., Яковлева Н. П. Обледенение судов на Черном море // Метеорология и гидрология. 2006. № 12. С. 75—86.