**ВЕРОЯТНОСТЬ БЕЗОТКАЗНОЙ РАБОТЫ НАДВОДНОЙ ЧАСТИ
НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОРСКИХ
СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАТФОРМ ГРАВИТАЦИОННОГО ТИПА****PROBABILITY OF NO-FAILURE OPERATION OF THE SURFACE
PART OF OIL-CONTAINING REINFORCED CONCRETE
MARINE STATIONARY PLATFORMS OF GRAVITATIONAL TYPE****П. А. Федоров**
Pavel A. FedorovУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**В. М. Абдуллин**
Valeriy M. AbdullinООО «БашНИПИнефть»
ПАО АНК «Башнефть» (дочернее
общество ПАО «НК «Роснефть»),
г. Уфа, Российская ФедерацияBashNIPIneft LLC, PJSC Bashneft
(PJSC Rosneft Oil Company), Ufa,
Russian Federation**М. М. Абдуллин**
Marat M. AbdullinУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation**Э. И. Нигматуллин**
Emil I. NigmatullinУфимский государственный
нефтяной технический
университет,
г. Уфа, Российская ФедерацияUfa State Petroleum
Technological University,
Ufa, Russian Federation

Развитие шельфовых месторождений углеводородного сырья в России способствует внедрению новых типов морских стационарных платформ гравитационного типа. Строительство этих объектов должно быть технико-экономически обоснованным, с обеспечением требуемой надежности и долговечности. Одним из критериев обоснования является гарантированный прогноз жизненного цикла платформ, который может вызвать преждевременную остановку деятельности платформ для проведения ремонтно-восстановительных работ. Поэтому поиск оптимальных методов оценки жизненного цикла является актуальной задачей. Проведенная оценка воздействия эксплуатационных сред на железобетонные платформы показала, что наибольшее воздействие оказывают ионы хлоридов и углекислый газ в зоне переменного увлажнения стволовой части кессона. В статье приводится анализ зарубежных нормативно-технических документов в области обеспечения долговечности бетона и железобетона в сравнении с отечественным стандартом. Последний показал существенные отставания требований к мерам первичной защиты, а именно в обеспечении плотности бетона, расхода цемента и др. Приводятся результаты анализа жизненного цикла железобетона при воздействии углекислого газа с учетом по модели «Duracrete» для надводной части платформ «Беркут», «Пельтун-Астохская-Б» и «Лунская-А». Определены параметры жизненного цикла платформы — индекс надежности и вероятность риска, которые показали, что при толщине защитного слоя 50 мм полная потеря надежности произойдет через 100 лет, пересечение кривых индекса надежности

Ключевые слова

долговечность, надежность,
жизненный цикл, вероятность,
железобетон, платформы,
углеводородное сырье,
карбонизация бетона,
коррозия стали, углекислый газ

и вероятности риска произойдет в районе 30–40 лет. С целью уточнения начала проведения первых ремонтно-восстановительных работ авторами предложено дополнительное определение «вероятности безотказной работы» морской платформы. Расчеты показали, что этот срок может наступить через 25 лет с начала эксплуатации.

The development of offshore hydrocarbon deposits in Russia contributes to the introduction of new types of stationary offshore gravity-type platforms. The construction of these facilities should be technically and economically feasible, while ensuring the required reliability and durability. One of the reliability criteria is a guaranteed forecast of the life cycle of the platforms, which may cause the platform to stop working prematurely for repair and restoration work. Therefore, the search for optimal methods of life cycle assessing is an urgent task. An assessment of the impact of operating environments on reinforced concrete platforms showed that chloride ions and carbon dioxide in the zone of variable moistening of the trunk part of the caisson have the greatest impact. The article provides an analysis of foreign regulatory and technical documents in the field of ensuring the durability of concrete and reinforced concrete in comparison with the domestic standard. The latter showed significant lags in requirements for primary protection measures, namely in ensuring the density of concrete, cement consumption, etc. The results of the analysis of the life cycle of reinforced concrete when exposed to carbon dioxide taking into account the «Duracrete» model for the surface part of the «Berkut», «Astokhskaya-B» and «Pelytun-Lunskaya-A». The parameters of the life cycle of the platform were determined, i.e. the reliability index and the risk probability, which showed that with a protective layer thickness of 50 mm, a complete loss of reliability will occur in 100 years, the intersection of the reliability index curves and the probability of risk will occur in the period of 30–40 years. In order to clarify the beginning of the first repair work, the authors proposed an additional definition of the «probability of no-failure operation» of the offshore platform. Calculations have shown that this period may occur 25 years after the start of operation.

Key words

durability, reliability, life cycle, probability, reinforced concrete, offshore concrete platforms, hydrocarbonic raw materials, concrete carbonization, steel corrosion, carbon dioxide

Уменьшение запасов добываемого углеводородного сырья на материковых месторождениях способствует освоению странами-экспортерами сырья шельфовых месторождений, в том числе с глубоководным залеганием нефти. Для обеспечения ее добычи и хранения в этих условиях требуются специальные гидротехнические сооружения — железобетонные морские стационарные платформы гравитационного типа (далее МСП-ГТ). В настоящее время в мире насчитывается свыше 50 таких сооружений.

В России успешно функционируют три МСП-ГТ. Так, в 2005 г. введены в строй платформы «Пильтун-Астохская-Б» и «Лунская-А» (проект освоения месторождений «Сахалин-П»), а в 2012 г. была установлена МСП-ГТ «Беркут» (проект освоения месторождений «Сахалин-Л»).

Конструктивное решение этих МСП-ГТ включают железобетонные массивные сооружения: полый кессон и колонны, стальную палубу с оборудованным сектором буровой установки, сектором сжигания попутных нефтяных газов (далее ПНГ), другими техноло-

гическими, эксплуатационными и жилыми модулями. Возводились эти платформы в сухом доке (порт Восточный, г. Находка), далее транспортировались и затопливались до проектного уровня на месторождениях. После этого на них монтировались специальные конструкции палубы, состоящей из буровой установки с эксплуатационными модулями. Для возведения кессона и колонн в качестве основного материала применялся высокопрочный гидротехнический бетон классов В60 и В85с маркой по морозостойкости F200 (кессон), F500 (колонны) и маркой по водонепроницаемости W16 (кессон) и W20 (колонны) [1, 2]. Согласно классификации проницаемости бетона, приведенной в работе [3], бетон относится к бетонам особо низкой проницаемости.

Строительство МСП-ГТ является дорогостоящим и требует технико-экономического обоснования. Одними из критериев обоснования являются требуемая надежность и проектный срок службы. Эти критерии напрямую зависят от выбора материала и себестоимости МСП-ГТ и определяют последующие сроки амортизации. Например, можно принять

состав бетона с водоцементным отношением 0,27–0,30 и получить низкую плотность структуры, которая будет значительно затормаживать процессы коррозии бетона. Однако стоимость специальных добавок значительно увеличивает себестоимость продукции.

С целью дальнейшего освоения шельфовых месторождений в России существует необходимость в разработке гарантированных методов расчета прогноза жизненного цикла.

Жизненный цикл здания или сооружения регламентируется ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». Под этим термином принято понимать общий период времени существования здания или сооружения, начиная от начала строительства и до его сноса и утилизации.

В работе [4] предложено «жизненный цикл железобетона» рассматривать как совокупность временных показателей, включающих в себя: период строительства, в котором создается строительная конструкция; период технической долговечности, как правило, начинающейся с момента ввода в эксплуатацию конструкции и последующий уход за ее состоянием до исчерпания проектного ресурса; период продленной долговечности, начинающийся с момента начала ремонтно-восстановительных работ и последующего эксплуатационного ухода за конструкцией до исчерпания проектного ресурса; период фактической долговечности — это период, включающий в себя циклически повторяющиеся периоды продленной долговечности до завершения проектного срока эксплуатации, а также наступления морального и физического износа конструкции, приводящего к ее утилизации или «рециклингу».

Жизненный цикл МСП-ГТ зависит от разных факторов, таких как срок освоения месторождения, агрессивность среды, стойкость применяемых материалов в этой среде и др. Обычно он составляет от 25 до 60 лет. В работе [5] отмечается, что для обеспечения тридцатилетнего срока эксплуатации необходимо толщину защитного слоя подводной части принять равной 50 мм, надводной — 65 мм. В нормативном документе Norwegian Code NS 3473 срок службы платформ должен составлять 100 лет с толщиной защитного слоя надводной части 70 мм и подводной — 60 мм. Проектный срок эксплуатации МСП-ГТ «Troll Gas» составляет 70 лет, МСП-ГТ

«Hebron» — 50 лет, МСП-ГТ «Беркут» — 45 лет. Средний срок эксплуатации большинства гидротехнических сооружений, в том числе в морской воде и в условиях Дальнего Востока, составляет 30–40 лет.

В настоящее время отсутствуют известные примеры МСП-ГТ, «жизненный цикл» которых прошел полностью все стадии. Например, первая железобетонная МСП-ГТ (резервуар для хранения углеводородного сырья «Ekofisk», установленный в Северном море на месторождении Норвегии (1973 г.)) находится в настоящее время на консервации. По данным работы [6], она может представлять угрозу техногенного масштаба из-за пропитки стенок резервуара нефтью. Эффективных и экологически чистых мероприятий по ее полной утилизации в настоящее время не существует.

Основными агрессивными источниками по отношению к железобетону, снижающими жизненный цикл МСП-ГТ, являются жидкие (морская вода, углеводородное сырье) и газовые среды (углекислый газ (CO_2), сероводород (H_2S) и др.). Степень воздействия сред МСП-ГТ, в соответствии с классификацией сред эксплуатации, регламентированной СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии», определена с помощью индексов (рисунок 1).

Они показывают, что наиболее опасными факторами для бетона и железобетона являются: XC4 — коррозия вследствие карбонизации в зонах попеременного увлажнения и высушивания при среднеагрессивном воздействии CO_2 , а в случае наличия в воздухе H_2S до сильноагрессивного; XS3 — коррозия, вызванная действием морской воды в приливной зоне (зоне разбрызгивания); XF3 — коррозия, вызванная попеременным замораживанием и оттаиванием при сильном водонасыщении.

Из рисунка 1 видно, что одним из наиболее агрессивных источников, способствующих сокращению жизненного цикла МСП-ГТ в надводной железобетонной части, является CO_2 . Это вызвано тем, что в районе МСП-ГТ атмосфера содержит повышенное количество кислых газов, образующихся при сжигании ПНГ. Концентрация кислых газов, очевидно, зависит от месторождения углеводородного сырья, способов его добычи, скорости и направления действия ветров в районе установки МСП-ГТ, способствующих перемещению газов с морским воздухом, приводя-

1 — балластная морская вода (верхний уровень); 2 — балластная морская вода (переменный уровень); 3 — воздушная среда с насыщенными солями; 4 — донный участок, образующийся из-за осадки платформы в грунт; 5 — зона постоянного нахождения конструкций в морской воде; 6 — переменная зона приливов и отливов морской воды; 7 — зона разбрызгивания волн об опоры; 8 — воздушная зона с насыщенными солями; 9 — выбросы кислых газов в атмосферу при сжигании ПНГ; 10 — шламовая вода; 11 — углеводородное сырье с содержанием CO_2 , серы и другие агрессивные компоненты; 12 — газозвушная среда резервуара с содержанием CO_2 и H_2S ; 13 — зона переменного уровня наливки углеводородного сырья

Рисунок 1. Эксплуатационная среда МСП-ГТ

щим к снижению концентраций кислых газов. В работе [7] указывается, что концентрация CO_2 у устья горелки может достигать 1–4 %. Однако расположение факела от железобетонных конструкций, как правило, находится на расстоянии около 50 м. С целью предварительного анализа и отработки методики авторами были проведены замеры концентрации CO_2 с помощью цифрового газоанализатора «НТ2000» возле факельной установки сжигания ПНГ (г. Салават, Республика Башкортостан). Результаты показали, что на расстоянии 50–100 м от ствола установки средняя концентрация CO_2 составляет около 0,3–0,4 % по объему. Можно предположить, что концентрация этого газа в районе МСП-ГТ находится в пределах 0,1–0,5 % по объему и должна ограничиваться значением предельно допустимой концентрации 9000 мг/м³.

В случае воздействия CO_2 как одного из основных источников воздействия на бетон жизненный цикл МСП-ГТ необходимо рассматривать как схему повреждения коррозии стали в бетоне, предложенной Tuutti [8]. Она представляет собой совокупность двух периодов: индукционный период; период повреждения или коррозии стали. В индукционный период CO_2 , поступая в поры бетона надводной части МСП-ГТ, карбонизирует гидратные фазы цементной матрицы защитного слоя бетона. Понижается щелочность бетона с pH 11,5 до 8–9. При понижении щелочности в зоне расположения арматуры и диффузии из атмосферы в бетон активных реагентов (кислород, хлориды и др.) начинается период повреждения или коррозии стали. Этот период происходит до критического предельного состояния, скорость его намного выше, чем

первого периода, который фактически характеризует жизненный цикл.

Долговечность бетона и железобетона должна, в первую очередь, регламентироваться мерами первичной защиты. К таким мерам, как правило, относятся толщина защитного слоя, расход цемента, водоцементное отношение или марка по водонепроницаемости, а также марка по морозостойкости, класс

прочности бетона на сжатие и другие показатели. В таблице 1 приведены некоторые нормируемые показатели из международных нормативно-технических документов в области защиты бетонных и железобетонных конструкций, ориентированных на строительство гидротехнических сооружений, в том числе МСП-ГТ.

Таблица 1. Нормативные требования для гидротехнического бетона МСП-ГТ [9] с требованиями стандарта ГОСТ 31384-2008

Показатель	Нормативно-технический документ					
	ACI 357	CSA S474	FIP	DnV	BS 6235	ГОСТ 31384-2008
<i>Максимальное водоцементное отношение:</i>						
зона постоянного пребывания в морской воде	0,45	0,45	0,45 (менее или равным 0,40)	0,45 (менее или равным 0,40)	0,40	0,45
зона переменного увлажнения (приливная зона, действия солёных брызг, волн)	0,40	0,40			0,40	0,45
зона атмосферного морского воздуха	0,40	0,40			0,40	0,50
<i>Минимальный расход цемента, кг/м³</i>						
зона постоянного пребывания в морской воде	356	300	320...360	300	320...360	320
зона переменного увлажнения (приливная зона, действия солёных брызг, волн)	356	300	400	400	400	340
зона атмосферного морского воздуха	356	300	320...360	300	400	300
<i>Максимальный расход цемента, кг/м³</i>						
зона постоянного пребывания в морской воде	415	—	500	—	—	—
зона переменного увлажнения (приливная зона, действия солёных брызг, волн)	415	—	500	—	—	—
зона атмосферного морского воздуха	415	—	500	—	—	—
<i>Минимальная цилиндрическая (кубиковая) прочность бетона в 28 дней, МПа</i>						
зона постоянного пребывания в морской воде	35 (42)	30/35 (36/42)	32 (38)	—	32 (38)	36 (45)
зона переменного увлажнения (приливная зона, действия солёных брызг, волн)	35 (42)	40/45 (48/54)	32...40 (38...48)	—	32...40 (38...48)	36 (45)
зона атмосферного морского воздуха	35 (42)	40/45 (48/54)	32 (38)	—	32 (38)	30 (37)

Как видно, из таблицы 1, требования ГОСТ 31384-2008 менее «жесткие» для рассмотренных типов сооружений.

Конструкции МСП-ГТ должны отвечать требуемым параметрам надежности и долговечности. В ГОСТ 27751-2014 под термином «надежность» принято понимать способность строительного объекта (например МСП-ГТ) без сбоев выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. Долговечность — это способность строительного объекта сохранять прочностные, физические и другие свойства, устанавливаемые при проектировании и обеспечивающие его нор-

мальную эксплуатацию в течение расчетного срока службы.

Эти параметры зависят от условия безотказной работы конструкций, в том числе стойкости бетона к агрессивной среде и экстремальным температурно-влажностным условиям эксплуатации [10].

Условие безотказной работы предельного неравенства имеет следующий вид:

$$S \leq R, \quad (1)$$

где S , R — случайные величины, характеризующие соответственно нагрузку (или ее следствие) и сопротивление, выраженные через одинаковые величины [11].

При оценке эффективности мер первичной защиты равенство (1) можно представить в виде вероятностной модели остаточного ресурса нейтрализации толщины защитного слоя бетона [10, 12] в следующей форме:

$$p_f \{a_{защ} - x_{carb}(T) < 0\} \leq p_0, \quad (2)$$

где p_f — вероятность риска нейтрализации защитного слоя, %; $a_{защ}$ — проектная толщина защитного слоя надводной части (колонны), мм; $x_{carb}(T)$ — глубина карбонизации бетона, мм; p_0 — проектная вероятность наступления события (2), %.

Проектная толщина защитного слоя:

$$a_{защ} = a_3 + \Delta a_3, \quad (3)$$

где a_3 — средняя толщина защитного слоя по проекту или результатам обследования, мм; Δa_3 — предельно допустимое отклонение защитного слоя при строительстве (для толщины 50 мм и более составляет минус 5, плюс 15 согласно СП 70.13330.2012 «Несущие и ограждающие конструкции»).

Для вероятностного моделирования принимаем стандартное нормальное распределение параметрами: медиана $\mu = 0$ мм; стандартное отклонение $\sigma = 5$ мм.

Глубина карбонизации в определенный период времени:

$$x_{carb}(T) = x_{c,0}(T) + \varepsilon_{x_c}, \quad (4)$$

где $x_{c,0}(T)$ — глубина карбонизации бетона с равномерным распределением фронта в образце, мм; ε_{x_c} — случайная величина отклонения фронта карбонизированного слоя в конструкции, мм.

Метод расчет глубины карбонизации бетона с равномерным распределением фронта в настоящее время является дискуссионным вопросом, связанным с большим числом изменяющихся параметров цементной матрицы при воздействии CO_2 (пористость, вид цемента, наличие наполнителей и т.д.), влияющих на механизм протекания процесса карбонизации. Некоторые исследователи считают, что глубина карбонизации описывается параболической закономерностью зависимости в виде «корня квадратного от времени» (5). Вторая группа исследователей на основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований установила, что для плотных бетонов и бетонов низкой и особо низкой проницаемости глубина карбонизации описывается степенной функцией в виде «корня в n -степени» (6).

$$x_{c,0}(T) = A_2 \cdot \sqrt{T}; \quad (4)$$

$$x_{c,0}(T) = A_n \cdot \sqrt[n]{T}. \quad (5)$$

Рассмотрим для дальнейших исследований модель «Duracrete»:

$$x_{c,0}(T) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s} \cdot \sqrt{T} \cdot W(T), \quad (6)$$

где k_e — коэффициент относительной влажности эксплуатационной среды; k_c — коэффициент твердения, характеризующий относительный период твердения бетона во влажных условиях; k_t — коэффициент регрессии; $R_{ACC,0-1}$ — обратное эффективное сопротивление карбонизации в бетоне, $(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$; ε_t — погрешность, обусловленная применением ускоренного метода карбонизации $(\text{мм}^2/\text{год})/(\text{кг}/\text{м}^3)$; $W(T)$ — функция, учитывающая переменное увлажнение бетонной поверхности дождевыми осадками в эксплуатационной среде.

Для расчета параметра надежности конструкции в работе [13] предложен индекс надежности β , который является множителем и характеризует информацию о коэффициенте, при этом стандартное отклонение переменной Z количественно отличается от расстояния между нулевой точкой и средним значением Z , то есть:

$$\mu_Z = \mu_{a_{защ}} - \mu_{x_{carb}(T)}, \sigma_Z = \sqrt{\sigma_{a_{защ}}^2 + \sigma_{x_{carb}(T)}^2},$$

$$p_f = \Phi\left(-\frac{\sigma_Z}{\mu_Z}\right) = \Phi(-\beta), \quad (7)$$

где Φ — функция стандартного нормального распределения.

Исходные данные для вероятностного моделирования параметров жизненного цикла приведены в таблице 2.

На основании проведенного анализа характера распределения индекса надежности и вероятности отказа от времени можно выделить частные случаи (рисунок 2): случай 1 — ускоренная нейтрализация бетона, несоответствующая проектному сроку; случай 2 — нейтрализация бетона со скоростью, соответствующей проектному сроку; случай 3 — медленная нейтрализация бетона, превышающая проектный срок службы, эффективные меры защиты.

Результаты вероятного расчета параметров жизненного цикла МСП-ГТ индекса надежности и вероятности отказа (рисунок 3), выполненные с учетом модели «Duracrete» (5), показали, что вероятность риска через 50 лет составит: для платформы «Беркут» — 15 %;

Таблица 2. Параметры для вероятностного моделирования

Параметр	Ед. изм.	Тип распределения	Наименование платформ					
			Беркут		Пильгун-Астохская-Б		Лунская-А	
			Медиана μ	Станд. откл. σ	Медиана μ	Станд. откл. σ	Медиана μ	Станд. откл. σ
ε_{xc}	мм	нормальное	0,1029	1	0,1029	1	0,1029	1
RH_{real}	%	бета	$\mu = 80,07; \sigma = 13,14; \alpha = 6,6; \beta = 1,643$		$\mu = 84,69; \sigma = 9,32; \alpha = 11,8; \beta = 2,132$		$\mu = 81,39; \sigma = 13,84; \alpha = 5,6; \beta = 1,286$	
b_c	—	нормальное	-0,567	0,024	-0,567	0,024	-0,567	0,024
k_t	—	нормальное	1,25	0,35	1,25	0,35	1,25	0,35
$R_{acc,0.1}$	(мм ² /год)/(кг/м ³)	нормальное	3500	401	3500	401	3500	401
ε_t	(мм ² /год)/(кг/м ³)	нормальное	315,5	48	315,5	48	315,5	48
C_s , атм	кг/м ³	нормальное	$8,2 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}	$8,2 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}	$8,2 \times 10^{-4}$	1×10^{-4}
b_w	—	нормальное	0,446	0,163	0,446	0,163	0,446	0,163
Δa_z	мм	нормальное	0	4,286	0	4,286	0	4,286

Рисунок 2. Частные случаи распределения β и p_f от времени

«Лунская-А» — 15 %; «Пильгун-Астохская-Б» — 7 %. Через 100 лет составит: для платформы «Беркут» — 41 %; «Лунская-А» — 38 %; «Пильгун-Астохская-Б» — 26 %. При этом индекс надежности стремится у всех МСП-ГТ практически к 0, т.е. эксплуатационный ресурс полностью исчерпан. Характеристики

распределения β и p_f от времени соответствуют второму случаю.

Недостатками приведенных графиков является то, что они не показывают, в какой период времени происходит обнаружение первых локальных участков повреждения, вызванных полным исчерпанием ресурса

Рисунок 3. Графики зависимости β и p_f от времени для МСП-ГТ

глубины защитного слоя бетона и последующей коррозии стали арматуры. Возможно, в этот период потребуется уже проведение соответствующих ремонтно-восстановительных работ.

Для учета этого фактора предлагается использовать для оценки продолжительности «жизненного цикла» МСП-ГТ с момента изготовления с помощью вероятности безотказной работы конструкции, предложенной в работе [14], которая определяется по следующей зависимости:

$$P(T) = P \left\{ \frac{N - n(T)}{N} \times 100\% \right\}, \quad (4)$$

где N — число вариантов развития скорости нейтрализации бетона, полученных на основе вероятностного метода расчета, т.е. зависимости вида (2); n_0 — число отказов или невыполнение условия вида (2) в определенный период; T — время эксплуатации, год.

На рисунке 4 приведен условный график изменения функции вероятности безотказной работы МСП-ГП от времени, на котором можно выделить три характерных периода:

— I период — период нормальной эксплуатации конструкции. В этот период происходит постепенная нейтрализация бетона защитного слоя конструкции, скорость которой зависит от плотности бетонного конгломерата и условий эксплуатации. Кроме того, в этом периоде вероятность безотказной работы составляет 97–100 %, т.е. не наблюдаются случаи невыполнения условия вида (1), а меры первичной защиты вполне удовлетворяют проектным требованиям;

— II период — период низкой (единичной) локализации фронта нейтрализации бетона на

Рисунок 4. Характер распределения вероятности безотказной работы от времени

толщину защитного слоя, характеризующегося появлением единичных отказов, как правило, образующихся в зонах с низкой степенью допустимого значения толщины защитного слоя, а также наличием микро- и макротрещин, образующихся в результате усадки или напряженно-деформированного состояния растянутой зоны. Продолжительность этого периода зависит от увеличения отказов выполнения неравенства вида (2) до 10 %;

— III период — период высокой локализации фронта нейтрализации бетона на толщину защитного слоя, характеризующийся тем, что в этот период происходит полная нейтрализация защитного слоя бетона на значительном количестве мест в конструкции, образующих сплошной фронт с потерей щелочности в зоне нахождения арматурных стержней. В результате этого происходит оголение арматурных стержней, растрескивание бетона защитного слоя.

Результаты безотказной работы рассматриваемых МГСП-ГП, полученные на основе вероятностного моделирования 2000 сценариев, показали, что наиболее низкий период безотказной работы характерен для МСП-ГТ «Лунская-А» (рисунок 5). Продолжительность I периода составляет порядка 20 лет с момента строительства, индекс надежности выше 3,8, вероятность риска 0 %. Во II периоде индекс надежности составляет от 3,8 до 1,0, вероятность риска от 0 % до 10 %. В III периоде вероятность безотказной работы составляет 80 %, а коэффициент надежности составляет от 1 до 0, а вероятность риска достигает 50 %.

При применении эффективных мер защиты железобетонных конструкций необхо-

Рисунок 5. График вероятности безотказной работы МСП-ГТ

димо еще на стадии проектирования оценивать возможность дальнейшей эксплуатации МСП-ГТ после освоения месторождения (например в качестве опор для ветряных электростанций).

Выводы

1. По результатам вероятностного моделирования с учетом модели «Duracrete» установлена вероятность риска повреждения МСП-ГТ «Беркут», «Лунская-А» и «Пильтун-Астохская-Б». Она заключается, в том что через 50 лет окажутся наиболее подверженными процессам коррозии МСП-ГТ «Беркут» и «Лунская-А» с вероятностью риска 15 %, для срока 100 лет вероятность составит 41 % и 38 % соответственно.

2. Установлен индекс надежности для отечественных железобетонных МСП-ГТ, заключающийся в том, что через 50 лет эксплу-

атации при незначительном изменении технологического и температурно-влажностного режима для МСП-ГТ «Беркут» и «Лунская-А» он составит 1; для «Пильтун-Астохская-Б» — 1,5. При сроке эксплуатации 100 лет индекс для «Беркут» и «Лунская-А» составит 0,1, а для «Пильтун-Астохская-Б» — 0,5.

3. Для объективной оценки жизненного цикла бетона и железобетона МСП-ГТ рекомендовано дополнительно определять зависимость вероятности безотказной работы от времени, при этом обязательным условием являются оценка индекса надежности и вероятности риска.

4. Установлен период безотказной работы надводной части железобетонных колонн, эксплуатирующихся в РФ по критерию углекислого газа МСП-ГТ, который составляет около 25 лет.

СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Александров А.В. Строительство железобетонных оснований буровых платформ для освоения морского шельфа в рамках проекта «Сахалин-II» // Гидротехническое строительство. 2006. № 10. С. 19–25.

2. Миронов М.Е. Буровая платформа «Беркут». Проектирование, изготовление и установка основания. СПб.: Политехнический институт, 2015. 247 с.

3. Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 520 с.

4. Гелен К. Предсказание долговечности и жизненный цикл железобетонных сооружений // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. 2013. № 2 (9). С. 106–111.

5. Нигматуллин Э.И. Срок службы и периода безотказной работы нефтедобывающих платформ гравитационного типа по критерию воздействия углекислого газа // Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук: матер. науч.-техн. конф. Уфа: УГНТУ, 2018. Вып. 12. С. 280–284.

6. FIB. Bulletin 18. Recycling of Offshore Concrete Structures Concrete. 2002, 35 p.

7. Рыбаков Б.А. Особенности сжигания нефтяного попутного газа в газотурбинных установках // Турбины и дизели. 2008. № 3. С. 2–8.

8. Tuutti K. Corrosion of Steel in Concrete. CBI-Forschung, 1982. 468 p.

9. George C. Hoff Concrete for Offshore Structures // Nawy E.G. Concrete Construction Engineering Handbook. CRC Press, 2008. Ch. 13. pp. 1–36.

10. Peter Schissel, Cristoph Gehlen, Gesa Kapteina. Assessment and Service Life Updating of Existing Tunnels // First International Symposium. Prague, 2004. pp. 189–198.

11. Аугустин Г. Вероятностные методы в строительном проектировании. М.: Стройиздат, 1988. 584 с.

12. Gehlen C. Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Germany, Berlin, 2000. 106 p.

13. Шалый Е.Е. Исследование процессов и механизма коррозии шельфовых сооружений острова Сахалин // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск, 2017. Вып. 9. С. 476–495.

14. Леликов О.П. Валы и опоры с подшипниками качения. Конструирование и расчет. М.: Машиностроение, 2006. 640 с.

REFERENCES

1. Aleksandrov A.V. Stroitel'stvo zhelezobetonnykh osnovanii burovykh platform dlya osvoeniya morskogo shel'fa v ramkakh proekta «Sakhalin-II» [Construction of Reinforced Concrete Foundations of Drilling Platforms for Offshore Development within the Sakhalin-II Project]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo — Power Technology and Engineering*, 2006, No. 10, pp. 19–25. [in Russian].

2. Mironov M.E. *Burovaya platforma «Berkut». Proektirovanie, izgotovlenie i ustanovka osnovaniya* [Drilling Platform «Berkut». Design, Manufacture and Installation of the Base]. Saint-Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University Publ., 2015. 247 p. [in Russian].

3. Rozental' N.K. *Korroziionnaya stoikost' tsementnykh betonov nizkoi i osobo nizkoi pronitsaemosti* [Corrosion Resistance of Cement Concretes of Low and Especially Low Permeability]. Moscow, FSUE «Center of Design Products of Mass Application», 2006. 520 p. [in Russian].

4. Gelen K. *Predskazanie dolgovechnosti i zhiznennyi tsikl zhelezobetonnykh sooruzhenii* [Prediction of Durability and Life Cycle of Reinforced Concrete Structures]. *Beton i zhelezobeton. Oborudovanie. Materialy. Tekhnologii — Concrete and Reinforced Concrete. Equipment. Materials. Technologies*, 2013, No. 2 (9), pp. 106–111. [in Russian].

5. Nigmatullin E.I. Srok sluzhby i perioda bezotkaznoi raboty nefte dobyvayushchikh platform gravitatsionnogo tipa po kriteriyu vozdeistviya uglekislogo gaza [The Lifespan and Period of Failure-Free Operation of Oil Platforms Gravity-Type Criterion of Exposure to Carbon Dioxide]. *Materialy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Aktual'nye problemy tekhnicheskikh, estestvennykh i gumanitarnykh nauk»* [Materials of Scientific and Technical Conference «Actual Problems of Technical, Natural and Humanitarian Sciences»]. Ufa, USPTU, 2018. Issue 12. pp. 280–284. [in Russian].
6. FIB. *Bulletin 18. Recycling of Offshore Concrete Structures Concrete*. 2002, 35 p.
7. Rybakov B.A. Osobennosti szhiganiya neftyanogo poputnogo gaza v gazoturbinnnykh ustanovkakh [Features of Oil Associated Gas Combustion in Gas Turbine Plants]. *Turbiny i dizeli — Turbines & Diesels*, 2008, No. 3, pp. 2–8. [in Russian].
8. Tuutti K. *Corrosion of Steel in Concrete*. CBI-Forschung, 1982. 468 p.
9. George C. Hoff Concrete for Offshore Structures. In: Nawy E. G. *Concrete Construction Engineering Handbook*. CRC Press, 2008. Ch. 13. pp. 1–36.
10. Peter Schissel, Cristoph Gehlen, Gesa Kapteina. Assessment and Service Life Updating of Existing Tunnels. *First International Symposium*. Prague, 2004. pp. 189–198.
11. Augustin G. *Veroyatnostnye metody v stroitel'nom proektirovanii* [Probabilistic Methods in Construction Design]. Moscow, Stroizdat Publ., 1988. 584 p. [in Russian].
12. Gehlen C. *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Germany, Berlin, 2000. 106 p.
13. Shalyi E.E. Issledovanie protsessov i mekhanizma korrozii shel'fovykh sooruzhenii ostrova Sakhalin [The Study of the Processes and Mechanism of Corrosion of Offshore Structures of Sakhalin Island]. *Sbornik nauchnykh trudov «Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona»* [Collection of Scientific Papers «Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete»]. Minsk, 2017, Issue 9, pp. 476–495. [in Russian].
14. Lelikov O.P. *Valy i opory s podshipnikami kacheniya. Konstruirovaniye i raschet* [Shafts and Supports with Rolling Bearings. Design and Calculation]. Moscow, Engineering Publ., 2006. 640 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

Федоров Павел Анатольевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Pavel A. Fedorov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Assistant Professor of Building Constructions Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

Абдуллин Марат Мансурович, канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры комплексного инжиниринга и компьютерной графики, УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Marat M. Abdullin, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor of Integrated Engineering and Computer Graphics Department, USPTU, Ufa, Russian Federation

e-mail: ingenernaya_grafika@mail.ru

Абдуллин Валерий Маратович, канд. техн. наук, главный технолог ООО «БаиНПИНефть» ПАО АНК «Башнефть» (дочернее общество ПАО «НК «Роснефть»), г. Уфа, Российская Федерация

Valery M. Abdullin, Candidate of Engineering Sciences, Chief Technologist BashNIPIneft LLC, PJSC Bashneft (PJSC Rosneft Oil Company), Ufa, Russian Federation

Эмиль Ирекович Нигматуллин, магистрант 2 года обучения по магистерской программе «Проектирование и строительство зданий и сооружений нефтегазовой отрасли», УГНТУ, г. Уфа, Российская Федерация

Emil I. Nigmatullin, Undergraduate Student of 2 Year Education of the Master's Program «Design and Construction of Buildings and Facilities of the Oil and Gas Industry», USPTU, Ufa, Russian Federation