

79
стр. Определение состояния
массива по эффекту
дискования керна

106
стр. Методика VoK
для масштабирования
ценности знаний

136
стр. Анализ трендов
перспективных материалов
для нефтегазовой отрасли

Декарбонизация российской нефтегазовой промышленности

стр. 115



**ПОГРУЖАЯСЬ
В АРКТИКУ**
арт-проект газпром_нефти



Посмотрите видео
со стенда «Газпром нефти»
на ПМЭФ

ОПТИМИЗАЦИЯ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ ОБЪЕКТОВ ДОБЫЧИ УГЛЕВОДОРОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДВОДНЫХ ДОБЫЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ. ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ

© Коллектив авторов,
2022



Ю.В. Бесхижко^{1,*}, В.В. Бесхижко¹, А.И. Ермаков²

¹ООО «Морнефтегазпроект», РФ, Москва

²Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, РФ, Москва

Электронный адрес: yulia-beshkizhko@yandex.ru

Введение. Широко известно применение подводных добычных комплексов (ПДКУ) на шельфе, однако их использование в арктических условиях сопряжено с рядом трудностей и носит крайне ограниченный характер.

Цель. Анализ существующих методов оптимизации линейно протяженных объектов и разработка методов, позволяющих реализовать оптимизационные подходы при разработке морских месторождений углеводородов. Разработана новая методика, позволяющая оптимизировать архитектуру системы объектов добычи углеводородов.

Материалы и методы. Опыт РФ по оптимальному проектированию линейно протяженных объектов и анализ арктических условий. Существующие методы оптимизации магистральных трубопроводов.

Результаты. Разработаны модель и метод для решения задач оптимизации архитектуры при освоении морских месторождений углеводородов с использованием ПДКУ. Разработанный метод, в отличие от применявшихся ранее двухмерных моделей, дает возможность решения задачи в трехмерной постановке. Предлагаемая впервые модель оптимизации использует алгоритм Беллмана–Форда применительно к трехмерным сетям. Разработанный алгоритм и сформированная блок-схема для частного случая оптимизации ПДКУ между одним начальным пунктом (забой скважины) и одним конечным пунктом (платформа / плавучая система добычи, хранения и отгрузки (FPSO) / берег) позволяет перейти к реализации предложенного подхода в виде программного комплекса, но не ограничивается этим. Для иллюстрации приведен упрощенный числовой пример.

Заключение. Представленный метод оптимального проектирования архитектуры ПДКУ позволяет решать задачу в частном случае, также может быть весьма эффективен применительно к арктическим условиям при освоении морских месторождений углеводородов. Авторы предполагают, что этот метод носит универсальный характер, но требуется дополнительное исследование.

Ключевые слова: системы подводной добычи, оптимизация, обустройство, Арктика

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Бесхижко Ю.В., Бесхижко В.В., Ермаков А.И. Оптимизация архитектуры системы объектов добычи углеводородов с использованием подводных добычных комплексов. Частный случай. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2022;7(3):96–105. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-3-96-105>

Статья поступила в редакцию 14.03.2022

Принята к публикации 27.05.2022

Опубликована 30.09.2022

THE ARCHITECTURE'S OPTIMIZATION OF HYDROCARBON PRODUCTION FACILITIES TO DESIGN SUBSEA SYSTEMS. PARTICULAR CASE

Yulia V. Beshkizhko^{1,*}, Vladislav V. Beshkizhko¹, Alexander I. Ermakov²

¹Morneftegazproject LLC, RF, Moscow

²National University of Oil and Gas "Gubkin University", RF, Moscow

E-mail: yulia-beshkizhko@yandex.ru

Background. The use of subsea production systems on the shelf is widely known. However, their use in Arctic conditions is associated with a number of difficulties and is extremely limited.

Aim. Analysis of existing optimization methods for linearly extended objects. Design of methods to implement optimization approaches in the development of offshore hydrocarbon fields. Development of new methods to analyze the architecture of hydrocarbon objects.

Materials and methods. The experience of the Russian Federation in the optimal design of linearly extended objects and the analysis of arctic conditions. Existing methods of optimization of trunk pipelines.

Results. An efficient model and method have been used to develop for Arctic field development design using the subsea production system (SPS). Compared to 2D models used in the past, the new design technique offers an opportunity to make 3D models and can be used for optimization of offshore field development projects.

The proposed optimization model is based on the Bellman–Ford algorithm developed for 3D networks. This approach has been used for the first time to capture key features and specific subsea production system design processes. The algorithm and block diagrams developed for the proposed SPS design method is universal. This method can be used to address tasks of a more general nature. Optimization of the particular case between a single start point (well location) and single end point (SPS facility) is implemented as a separate software package, but the scope of applications is not limited by such cases and may be extended even further.

Conclusion. The presented method of optimal design of SPS architecture allows solving the problem in a particular case. It can also be very efficient for Arctic subsea field development. The authors suggest that this method is universal, however further research is required.

Keywords: subsea production systems, optimization, development, Arctic

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Beshkizhko Y.V., Beshkizhko V.V., Ermakov A.I. The architecture's optimization of hydrocarbon production facilities to design subsea systems. Particular case. PRONEFT. Professionally about oil. 2022;7(3):96–105. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-3-96-105>

Manuscript received 14.03.2022

Accepted 27.05.2022

Published 30.09.2022

ВВЕДЕНИЕ

Подводные добычные комплексы нашли весьма широкое распространение в мировой практике морской добычи углеводородов. Начиная с 1961 года (месторождение West Cameron в Мексиканском заливе), сотни морских месторождений обустроены и находятся в эксплуатации с использованием как элементов систем подводной добычи [1], так и полностью автоматизированных подводных добычных комплексов по извлечению углеводородов (ПДКУ). В настоящее время насчитывается более 130 морских месторождений [2], где применяются технологические процессы по добыче углеводородов на морском дне.

Помимо прочего ПДКУ по сравнению с «сухим» заканчиванием скважин морских месторождений характеризуются относительно невысокими затратами на их сооружение, повышенной безопасностью в связи со значительной степенью автоматизации и более стабильными окружающими условиями. Вместе с тем затраты и сложность изготовления и строительства ПДКУ значительны и составляют сотни миллионов долларов за усредненный комплекс. Например, в 2012 году общемировые капитальные и эксплуатационные расходы на подводную добычу составили более 250 млрд долларов [3]. В РФ работы по применению ПДКУ находятся на начальном этапе развития. По состоянию на дату публикации зарегистрировано 78 лицензионных участков на шельфе РФ [4], из которых с использованием ПДКУ освоено Кириновское газоконденсатное месторождение, рассматриваются возможности их применения на некоторых других месторождениях. Потребность российских нефтегазовых компаний в элементах подводных добычных

комплексов оценивается в 400 единиц до 2035 года, а серийное производство такого оборудования в России может быть начато в ближайшее время [5].

Учитывая особенности расположения морских месторождений углеводородов РФ (большая часть находится в арктических регионах), а также отсутствие производственных мощностей и инфраструктуры, можно констатировать значительное увеличение затрат на освоение таких месторождений.

Арктические регионы характеризуются крайне суровыми природными условиями, в т.ч. наличием льдов, торосов, айсбергов в акватории, низкими температурами, вечной мерзлотой, сильными ветрами, волнами, течениями, коротким навигационным сезоном. Другим крайне важным аспектом является практически полное отсутствие инфраструктуры.

Все это ведет к необходимости минимизации нахождения людей на объектах данного региона, разработке специального оборудования и методов проведения работ, соответствующих нормативной документации. Кроме того, необходимо выполнять специальные требования, предъявляемые к материалам, используемым при низких температурах [6].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При рассмотрении морских месторождений существующие методы освоения сухопутных месторождений не всегда могут быть применимы. Для их реализации требуется учет большего количества разнообразных факторов в сочетании со значительно увеличенными затратами, что ведет к необходимости принятия оптимальных решений.

Предлагаемый метод позволяет получить такие решения уже на ранних этапах проектирования.

ЗАДАЧА ОСВОЕНИЯ МОРСКОГО МЕСТОЖДЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОДВОДНЫХ ДОБЫЧНЫХ КОМПЛЕКСОВ СХОДНА С ОПТИМИЗАЦИЕЙ ТРАСС ТРУБОПРОВОДОВ, ОДНАКО РЕШАЕТСЯ НЕ ТОЛЬКО В ПЛОСКОСТИ ДНА, НО И В ТРЕХМЕРНОМ ПРОСТРАНСТВЕ, УЧИТЫВАЯ РАСПОЛОЖЕНИЕ РЕЗЕРВУАРОВ.

По результатам проведённого анализа следует отметить, что вопросам оптимизации уделяется значительное внимание, в частности в следующих областях: математика, дорожное строительство, нефтегазовая отрасль. Так, предпринимались попытки оптимизации трасс автомобильных дорог на основе алгоритма вероятностной дорожной карты (ВДК) с учетом рельефа земной поверхности и препятствий [7]. То есть рассматривается поиск оптимальной трассы автомобильной дороги с минимальным значением целевой функции стоимости строительства из начальной точки в конечную точку на заданной поверхности, минуя препятствия. Для дискретного описания исходных данных формируется граф. Общее количество вершин графа определяется заданным количеством рассматриваемых точек ВДК в пространстве конфигураций (на заданной поверхности), свободном от препятствий. Каждой вершине графа соответствует определённое пространственное положение точки трассы в свободном пространстве дорожной карты. Далее осуществляется поиск из начальной вершины в конечную вершину, представляющую собой последовательность из нескольких вершин графа дорожной карты. После того как сформирована матрица весов графа, осуществляется поиск кратчайшего пути между двумя вершинами графа при помощи традиционных алгоритмов поиска на графе. Далее выполняется интерполяция и локальная оптимизация найденной первичной трассы. После локальной оптимизации найденная трасса описывается как последовательность из смежных вершин, заданных на равномерной сетке вдоль оси X в плане. В РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина выполнен большой комплекс научных исследований по оптимизации трасс магистральных трубопроводов под общим руководством профессора П.П. Бородавкина [8–14]. В этих научных исследованиях для выбора оптимальных трасс магистральных трубопроводов использовались методы оптимизации, построенные на принципе оптимальности Беллмана (принцип

динамического программирования), алгоритме Ли. Практическая реализация моделей выполнялась на двумерных сетевых моделях (2D-модель). На область поиска наносились различные сетки: прямоугольные, с диагоналями, произвольные и другие. Наиболее эффективными показали себя сетки с диагоналями и произвольные сетки. Учитывая, что значительная часть ПДКУ представлена линейно протяженными объектами (трубопроводами разного назначения, шлангокабелями и др.), можно предположить, что задача освоения морского месторождения углеводородов с использованием ПДК весьма сходна с оптимизацией трасс трубопроводов, расположенных в горизонтальной плоскости. Однако является значительно более сложной задачей, учитывая то, что на параметры выбора схемы размещения элементов ПДК в большой степени влияет структура природного резервуара углеводородов и способы его достижения. Соответственно задача оптимизации решается не только в плоскости дна, но и в пространстве, учитывая расположение резервуаров. В России известны работы в части оптимизации ПДКУ [15–16]. Так, в работе Корниенко О.А. рассмотрены методики выбора рациональной схемы размещения и типы подводных добычных комплексов; методики определения оптимальной производительности морских технологических объектов обустройства; методики выбора рациональных схем комплексного обустройства морских месторождений. Но предлагаемые модели ограничиваются частными, локальными решениями задач оптимизации ПДКУ [10]. Можно рассматривать 2D-модель, если ограничиться точками выхода скважин на поверхность, но подобный подход оставляет нерешенным вопрос взаимозависимости трубопроводов и скважин, т.е. может быть вертикальная скважина с продолжением от неё трубопровода на место назначения. С другой стороны, в настоящее время существует достаточно широкая практика бурения горизонтально-направленных скважин. При таком подходе может быть сокращена протяженность линейной части ПДКУ на дне либо протяженность скважины и, соответственно, общая стоимость освоения месторождения. Для дальнейшей реализации предполагается рассматривать цифровую 3D-модель. Учитывая опыт реализации процессов оптимизации при выборе морских трубопроводов, предложено осуществлять поиск оптимальной конфигурации системы на 3D-модели с диагоналями типа параллелепипеда

с числом узлов по осям: M — узлов по оси x ; N — узлов по оси y ; L — узлов по оси z . В частном случае при рассмотрении освоения месторождения от одной начальной до одной конечной точки в качестве начальной принимается забой скважины. Положение этой точки фиксировано и определяется геологами. Обозначим её как точка H с координатами x_H, y_H, z_H . Начальная точка совпадает с ближайшим из узлов сети. Верхняя поверхность 3D-модели будет рассматриваться как поверхность дна и конечная точка должна совпадать с одним из узлов. Конечной точкой K с координатами x_K, y_K, z_K может являться горизонтальная проекция на дно моря, платформа, FPSO или точка выхода на берег. Отрезки между смежными узлами определяют значение для выбранного критерия оптимальности (далее условно будем называть их стоимостями C как наиболее часто используемый критерий). При оптимизации пути могут учитываться следующие наиболее важные критерии: затраты в рамках жизненного цикла проекта; временной показатель; риски, включая безопасность; другие критерии. Принятый критерий при необходимости рассматривается с учетом ограничений по другим критериям. Таким образом, для каждого отрезка нам нужно установить числовую величину критерия. В частности, для капитальных вложений:

- распределённые затраты (например, стоимость 1 км скважины / трубопровода / шлангокабеля);
- сосредоточенные затраты (например, подводное заканчивание скважины, манифольд, подводное хранилище и т.д.).

Для оптимизации ПДКУ, располагаемого в арктической области или области, близкой к ней по характеристикам, затраты вычисляются с учетом факторов, их определяющих. Таким образом, задача состоит в отыскании на предложенной 3D-модели кратчайшего стоимостного пути между начальной (–ыми) и конечной точками. То есть необходимо найти множество точек W_{opt} , принадлежащее множеству точек W_{3D} модели, удовлетворяющее условию:

$$C_{w_{opt}} = \min C_{w_{HK}},$$

где:

$$C_{w_{HK}} = \sum_1^y C_{w_{j+1, w_j}}, \quad (1)$$

j — количество узлов по пробному пути между начальной и конечной точками;

$$C_{w_{opt}} = \sum_1^x C_{w_{j+1, w_j}}, \quad (2)$$

i — количество узлов по оптимальному пути. Стоимость оптимального пути не является простым суммированием, а зависит от условий его прохождения и может изменяться скачкообразно, более того, путь может переходить от 3D-сети к 2D-сети. Кроме того, оптимальный путь может характеризоваться и другими параметрами. Некоторые общие принципы подхода показаны ниже на примере частного случая оптимизации. При этом поиск производится от начальной точки. Начальные и конечные точки совмещаются с узлами 3D-сети, производится поиск оптимального варианта освоения в соответствии с принятым критерием. Следует отметить, что критерий оптимальности не является линейным (аддитивным), поэтому обычные методы оптимизации применены здесь быть не могут. Например, скважина на поверхности имеет резкий скачок критерия оптимальности, обусловленный подводным заканчиванием скважины. При этом также меняются характеристики пробного пути: он продолжается по двумерной сети с другими значениями критерия.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Фрагменты блок-схемы процесса поиска для случая «Один начальный — один конечный пункты» представлены на рис. 1 и 2. Для иллюстрации приведем пример поиска на 3D-сети небольшого размера (рис. 3). Возьмём 3D-сеть 5x5x3 узла. Пусть начальная точка принадлежит узлу H с координатами (1; 1; 0), конечная точка K с координатами узлов (4; 3; 3). Поверхность дна (D) определяется узлами сети с координатами $z = 3$. Примем условие, что поверхность дна плоская, проходит через точку K . Некоторые допущения представлены ниже:

- для выполнения расчета (для простоты ручного счета) стоимость отрезков сети, в зависимости от соединяемых узлов, примем пропорционально их фактической длине. Наиболее короткий отрезок (параллельный оси) примем за единицу длины;
- примем стоимость критерия для наиболее коротких отрезков, не принадлежащих поверхности дна, C_p равным 1 млн условных единиц. Физически это является стоимостью сооружения 1 длины скважины;
- для наиболее коротких отрезков, принадлежащих дну, C_d , за единицу длины примем 0,5 млн условных единиц. Физически

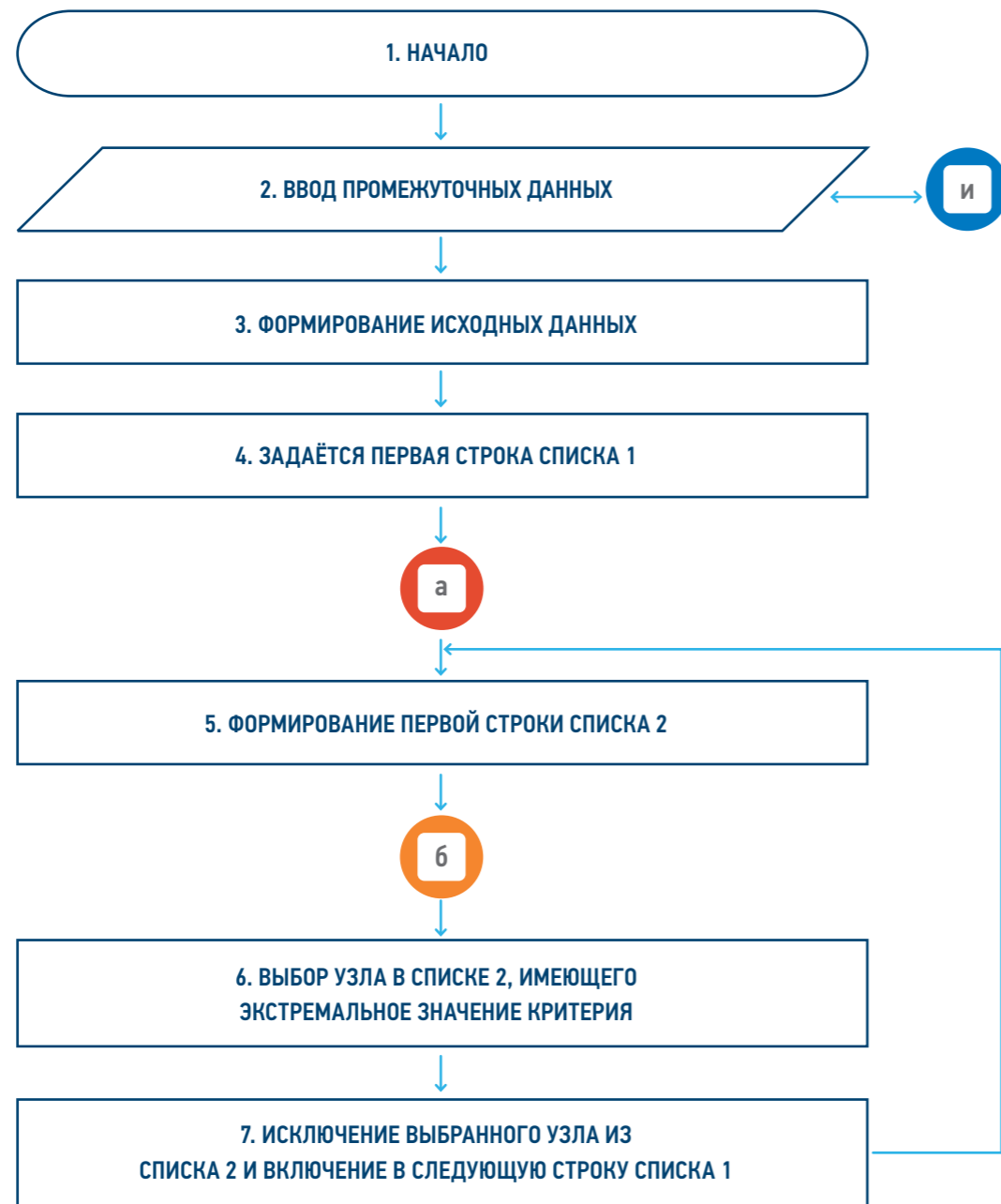


Рис. 1. Блок-схема процесса поиска при оптимизации схемы освоения месторождения с использованием ПДКУ. Часть 1. Составлено авторами
 Fig. 1. Block diagram of the selection process during optimization of the field development pattern using a subsea production system. Particular case. Part 1. Prepared by authors

это будет означать стоимость прокладки шлангокабеля и трубопровода;
 • при достижении пробным путём поверхности дна имеет место скачок стоимости, обозначим его C_c . Он определяется затратами на оборудование в этой точке (донная плита, фонтанная арматура, защитное устройство и т.д.).

$$C_p = f(C_e, C_s, C_{con}, C_d), \quad (3)$$

$$C_d = f(C_e, C_s, C_{con}, C_d), \quad (4)$$

$$C_c = f(C_e, C_s, C_{con}, C_d), \quad (5)$$

где: C_e — стоимость оборудования; C_s — стоимость доставки; C_{con} — стоимость монтажа; C_d — другие затраты. Примем стоимость C_c в виде постоянной величины, равной 5 млн условных единиц. Далее переходим к непосредственной реализации примера, который приведён в табл. 1. Поиск осуществляется в виде двух списков «Список 1» и «Список 2». Стоимость пути составляет 5,51 млн условных единиц. Стоимость сухого заканчивания 2,5 млн условных единиц. Общая стоимость 8,01 млн условных единиц.

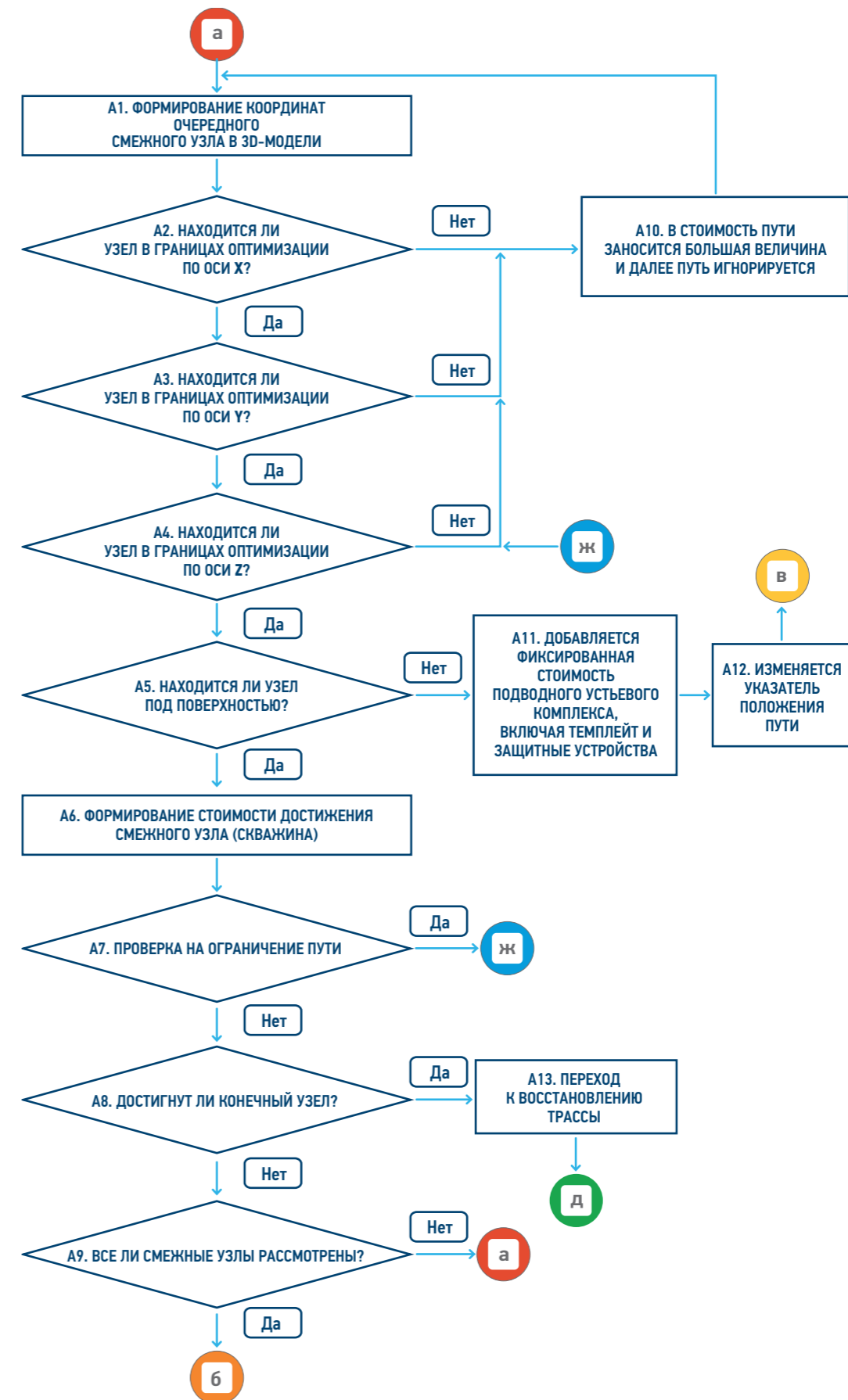


Рис. 2. Блок-схема процесса поиска при оптимизации схемы освоения месторождения с использованием ПДКУ. Часть 2 (частный случай). Составлено авторами
 Fig. 2. Block diagram of the selection process during optimization of the field development pattern using a subsea production system. Particular case. Part 2. Prepared by authors

Таблица 1. Пример реализации поиска оптимального пути для случая «Один начальный — один конечный пункты»
Table 1. Example implementation of an optimal path for the case "One start point — one end point"

№ шага	Список 1				Список 2			Примечания
	Координаты (x; y; z)	Номер шага из списка 2	Стоимость достижения точки, ед.	Характер пробного пути*	Координаты (x; y; z)	Стоимость достижения точки, ед.	Стоимость + предыдущий шаг (накопительно)	
1	(1; 1; 0)	-	0,00	0	(1; 1; 1)	1,00	1,00	Теоретически нужно надстраивать пути по всем допускаемым сетью направлениям, однако, исходя из объёма вычислений, расчет будет выполняться для путей, имеющих физический смысл в соответствии с заданными ниже ограничениями. Допущения: стоимость изменяется по дугам сети (между узлами) равномерно. Комментарии: - для шага 1 сформированы все возможные пробные пути на один шаг; - далее выбирается путь с минимальной стоимостью (при наличии нескольких путей берется один из них). Ограничения: не будут рассматриваться пути, ведущие назад, в том числе идущие по диагонали.
				0	(1; 0; 0)	1,00	1,00	
				0	(0; 1; 0)	1,00	1,00	
				0	(1; 2; 0)	1,00	1,00	
				0	(2; 1; 0)	1,00	1,00	
				0	...	-	-	
2	(1; 1; 1)	Из шага 1 списка 2	1,00	0	(1; 1; 2)	1,00	2,00	
				0	(0; 1; 2)	1,41	2,41	
				0	(1; 0; 2)	1,41	2,41	
				0	(2; 1; 2)	1,41	2,41	
				0	(1; 2; 2)	1,41	2,41	
				0	...	...	...
3	(1; 0; 0)	Из шага 1 списка 2	1,00	0	(1; 0; 1)	1,00	2,00	Координаты и стоимости вычисляются аналогично шагу 2
0	...	...	...		
4	(0; 1; 0)	Из шага 1 списка 2	1,00	0	(0; 1; 1)	1,00	2,00	Координаты и стоимости вычисляются аналогично шагу 2
0	...	...	...		
5-52 ...								
...53	(2; 0; -1)	Из шага 27 списка 2	2,73	0	(2; 0; 0)	1,00	3,73	Координаты и стоимости вычисляются аналогично шагу 2
0	...	...	...		
54	...далее процесс продолжается аналогично, т.е. каждый раз мы выбираем из оставшихся путей списка 2 путь с минимальной стоимостью.							
На определённом шаге рассматриваемый пробный путь достигает дна. В такой ситуации к стоимости пробного пути, упоминавшегося ранее, добавляется постоянная величина C_c и рассматриваются смежные точки, находящиеся только в плоскости дна D . Далее надстройка осуществляется для путей, проходящих только на поверхности дна, стоимость их определена как $F(C_d)$. Остальные пути продолжают надстраиваться обычным образом.								
...	(4; 3; 3)	Процесс продолжается до тех пор, пока в списке 1 не окажется конечная точка. После чего производится восстановление выбранного пути (для этого используется столбец «Номер шага из списка 2» таблицы). По шагу списка 2 определяется смежная точка, расположенная в той же строке списка 1. И так далее, пока не будет достигнута начальная точка.						
* 0 — путь идет под поверхностью (скважина), 1 — путь идет по дну (поверхностно-линейные объекты).								
Зачеркнутые координаты и цифры: информация о пробном пути с минимальной стоимостью вычеркивается из списка 2 и заносится в следующий шаг списка 1.								

Для наглядности далее приведён пример с подводным заканчиванием скважины (рис. 4). Стоимость достижения при условии использования вертикальной скважины и линейных объектов, соединяющих скважину с платформой, составляет 9,91 млн условных единиц. Таким образом, представленный частный случай (один начальный — один конечный пункты) является постановкой задачи для её последующей реализации. Вместе с тем этот подход открывает пути решения общей задачи, в которой будут рассмотрены в качестве начальных точек несколько скважин с последующей передачей флюида в одну конечную точку (стационарная платформа / FPSO / непосредственно на берег), или, иначе говоря, от залежей — до места подготовки продукта.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Проведены исследования и рассмотрены оптимизационные подходы, применяемые при проектировании линейно-протяженных объектов.
- На основе выполненного анализа и накопленного значительного опыта в РФ в области оптимизации трасс магистральных трубопроводов предпринята попытка развить и применить эти методы для оптимизации освоения морских месторождений углеводородов с использованием систем подводной добычи.
- Сформулирован подход к оптимизации систем подводной добычи, основанный на использовании алгоритма Беллмана-Форда применительно к 3D-сетям, т.к. использование двумерных сетевых моделей является недостаточным.

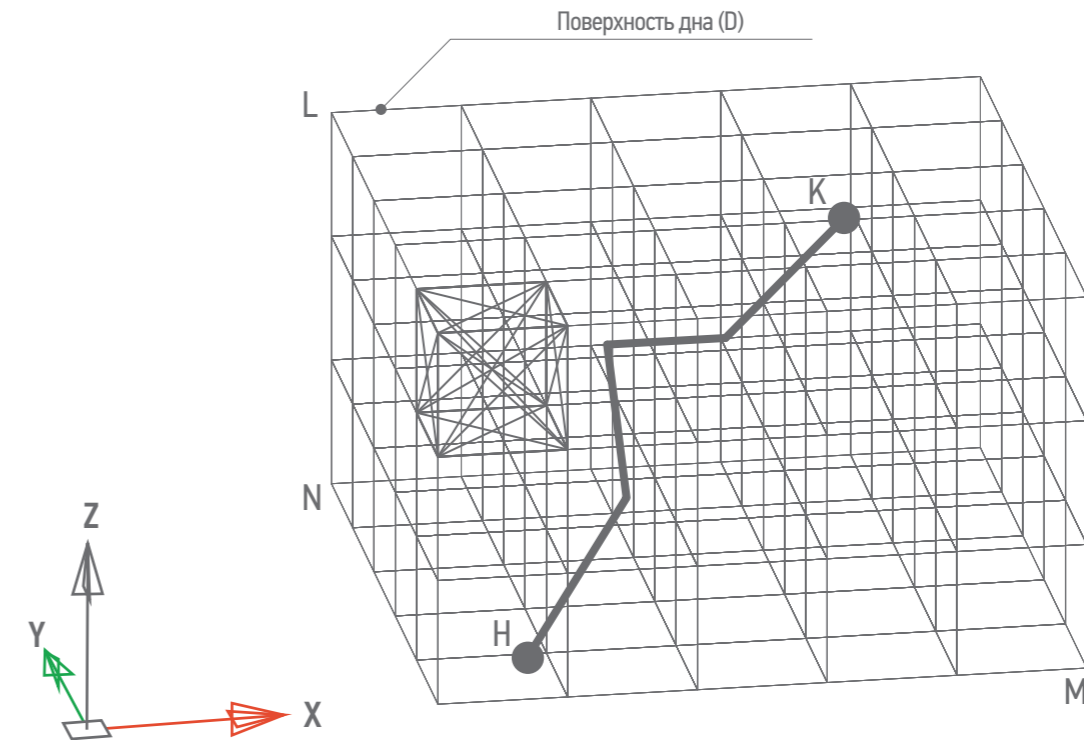


Рис. 3. Графическая иллюстрация расчета для поиска оптимальной схемы освоения месторождения в 3D-модели с диагоналями (диагонали показаны только в одной ячейке для простоты восприятия. Приведенный пример не является фактической реализацией, а носит иллюстративный характер). Составлено авторами
Fig. 3. Graphic illustration of calculation for selection of the most efficient SPS design for future field development using 3D model with diagonals (diagonals are shown in one cell only for illustrative purposes. The example is illustrative and does not represent an actual implementation). Prepared by authors

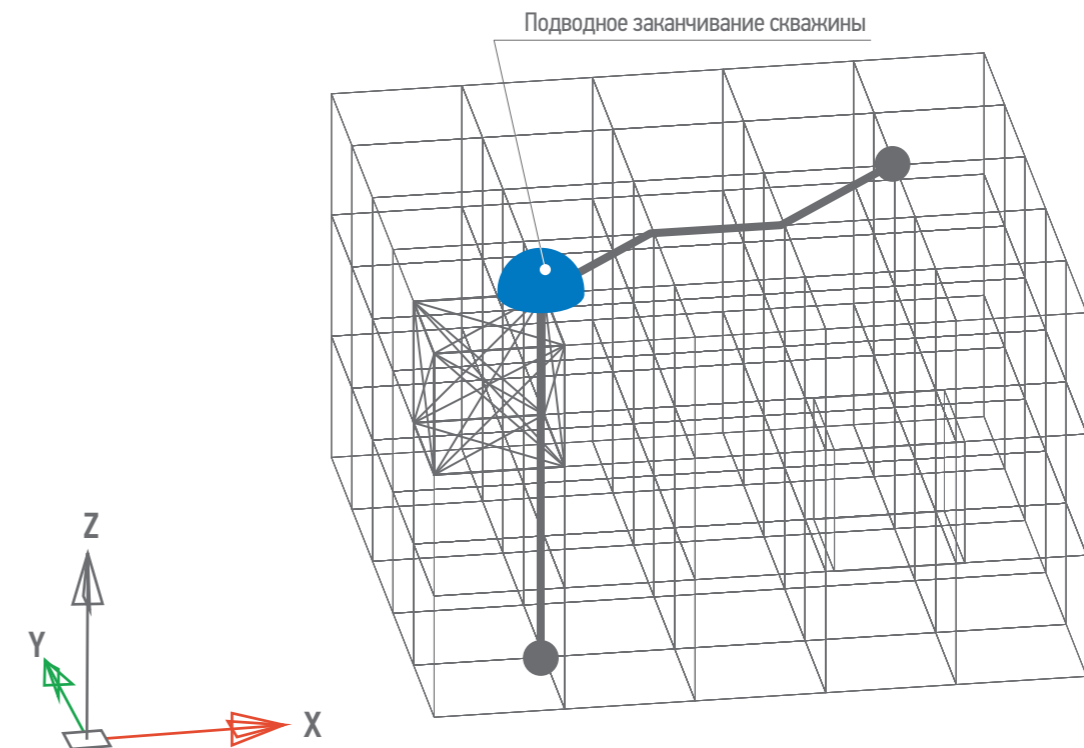


Рис. 4. Графическая иллюстрация использования скважины с подводным заканчиванием (приведенный пример не является фактической реализацией, а носит иллюстративный характер). Составлено авторами
Fig. 4. Graphic illustration of the use of subsea well (the example is illustrative and does not represent an actual implementation). Prepared by authors

- Предложенный подход позволяет учесть особенности создания ПДКУ в арктических условиях.
- Разработан алгоритм и сформирована блок-схема для частного случая между одним начальным и одним конечным пунктами. Для иллюстрации рассмотрен числовой пример процесса реализации.
- Реализация подхода осуществляется в виде программного комплекса.
- Предложенный метод носит универсальный характер, его применение возможно для более общих задач, он может быть весьма эффективным при реализации для обычных месторождений углеводородов, но еще более эффективен для морских месторождений углеводородов в арктических условиях.

Список литературы

1. Offshore and subsea facilities [Petrowiki .spe.org]. 2022 [обновлено 2 июня 2015]. URL: https://petrowiki.spe.org/Offshore_and_subsea_facilities
2. Люгай Д.В. Мансуров М.Н. Эволюции в подводной добыче нефти и газа. URL: <https://www.neftegas.info/gasindustry/-06-2018/evolyutsii-v-podvodnoy-dobyche-nefti-i-gaza/>
3. Bai Yong, Bai Qiang. Subsea Structural Engineering Handbook, Oxford: Elsevier, 2010. — С. 919.
4. Список месторождений нефти, газа, конденсата России. ООО «НАЦ ГеоНедра». URL: <https://geonedra.ru/knowledge-base/oil-gas-fields-all-2021/>
5. Серийное производство элементов системы подводной добычи в России начнется в 2021 году. URL: <http://geoinform.ru/serijnnoe-proizvodstvo-elementov-sistemy-podvodnoj-dobychi-v-rossii-nachnetsya-v-2021-godu/>
6. Гудместад О.Т. Аспекты освоения арктических шельфовых месторождений нефти и газа. Издательский центр РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. — М., 2008. — 57 с.
7. Щербанов В.С., Коротков М.С. Оптимизация трассы автомобильной дороги на рельефе с препятствиями методом вероятностной дорожной карты. Вестник СибАДИ. — 2012. — Выпуск 6(28) — 5 с.
8. Бородавкин П.П., Березин В.Л. Сооружение магистральных трубопроводов: [Учеб. для вузов по спец. «Сооружение газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз»] — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1987. — 471 с.
9. Брагилевский О.В., Вяткин В.Н. Организационное обеспечение трубопроводного строительства. — М.: Недра, 1985. — 102 с.
10. Бородавкин П.П., Сощенко Е.М., Ким Б.И., Брагилевский О.В. Выбор оптимальных трасс магистральных трубопроводов большой протяженности / [П.П. Бородавкин, Е.М. Сощенко, Б.И. Ким, О.В. Брагилевский]; Всесоюз. науч. исслед. ин-т организации, управления и экономики нефтегазовой пром-сти. — М.: ВНИИОЭНГ, 1977. — 57 с.
11. Ким Б.И. Выбор оптимальных трасс магистральных нефтепродуктопроводов с учетом расстановки насосных станций: дис. ... канд. тех. наук : 05.15.07. Ким Б.И. — М., 1974. — 163 с.
12. Самойлов Б.В. Исследование секционирования линейной части магистральных нефте- и продуктопроводов: дис. ... канд. тех. наук : 05.00.00. Самойлов Б.В. Уфа, 1971. — 154 с.
13. Кувичко И.Ю. Автоматизация выбора решений при проектировании трубопроводов: дис. ... канд. тех. наук : 05.15.13. Кувичко И.Ю. Москва, 1991. — 182 с.
14. Безкоровайный В.П. Разработка методов оптимизации трасс магистральных газопроводов и их разветвлений для сетей произвольной конфигурации: дис. ... канд. тех. наук : 05.15.07. Безкоровайный В.П. Москва, 1978. — 197 с.
15. Корниенко О.А. Разработка рациональных методов обустройства углеводородных месторождений арктического шельфа: дис. ... канд. тех. наук : 25.00.18. Корниенко О.А. Москва, 2007. — 99 с.
16. Зубков С.К., Дряхлов В.С., Каменский Г.А. Подводная станция ППД. Оптимизация схемы обустройства морского нефтяного месторождения с применением ПДК. URL: <https://magazine.neftegas.ru/articles/dobycha/707789-podvodnaya-stantsiya-ppd-optimizatsiya-skhem-obustroystva-morskogo-neftyanogo-mestorozhdeniya-s-pri/>

References

1. Offshore and subsea facilities [Petrowiki .spe.org]. 2022 [updated June 2, 2015]. URL: https://petrowiki.spe.org/Offshore_and_subsea_facilities
2. Lyugai D.V., Mansurov M.N. 2018 Evolutions in subsea oil and gas production, *Gazovaya promyshlennost'*, №6 2018.
3. Bai Yong, Bai Qiang *Subsea Structural Engineering Handbook*, Oxford: Elsevier, 2010. P. 919.
4. *List of oil and gas, deposits in Russia*. LLC NAC GeoNedra. URL: <https://geonedra.ru/knowledge-base/oil-gas-fields-all-2021/>
5. *Serial production of subsea production system components in Russia will start in 2021*. URL: <http://geoinform.ru/serijnnoe-proizvodstvo-elementov-sistemy-podvodnoj-dobychi-v-rossii-nachnetsya-v-2021-godu/>
6. Gudmestad O.T. *Engineering aspects related to Arctic offshore developments*. Gubkin University' Publishing Center, 2007. 57 p.
7. Shcherbakov V.S., Korytov M.S. Optimization of a highway route on a relief with obstacles using the probabilistic roadmap method, *Vestnik SibADI*, 2012, p 5.
8. Borodavkin P.P., Berezin V.L. *Construction of trunk pipelines: [Textbook, for universities on special "Construction of oil and gas pipelines, gas storage facilities and tank farms"]* — 2nd ed., revised. and additional. M.: Nedra, 1987., 471 p.
9. Bragilevsky O.V., Vyatkin V.N. *Organizational support of pipeline construction*. Moscow: Nedra, 1985. 102 p.
10. Borodavkin P.P., Soshchenko E.M., Kim B.I., Bragilevsky O.V. *Selection of optimal routes for long-distance export pipelines*, VNIIOENG, 1977. 57 p.
11. Kim B.I. *Selection of the optimal routes of main oil product pipelines taking into account the arrangement of pumping stations: dissertation at Gubkin University* (specialty code: 05.15.07), 1974. 163 p.
12. Samoilov B.V. Investigation of sectioning of the linear part of the main oil and product pipelines: dissertation at Ufa State Petroleum Technological University (specialty code: 05.00.00), 1971. 154 p.
13. Kuvychko I.Yu. *Automation of choice of decisions in the design of pipelines: dissertation at Gubkin University (specialty code: 05.15.13)*, 1991. 182 p.
14. Bezkorovainy V.P. *Development of methods for optimizing the routes of main gas pipelines and their branches for networks of arbitrary configuration: dissertation at Gubkin University* (specialty code: 05.15.07), 1978. 197 p.
15. Kornienko O. A. *Development of rational methods for the arrangement of hydrocarbons of the Arctic shelf fields: dissertation at Gazprom VNIIGAZ LLC* (specialty code: 25.00.18), 2007. 99 p.
16. Zubkov S.K., Dryakhlov V.S., Kamensky G.A. *Underwater station of maintain formation pressure. Optimization of the offshore oil field development scheme using SPS*. URL: <https://magazine.neftegas.ru/articles/dobycha/707789-podvodnaya-stantsiya-ppd-optimizatsiya-skhem-obustroystva-morskogo-neftyanogo-mestorozhdeniya-s-pri/>

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Ю.В. Бесхижко — сбор и анализ данных, разработка концепции, выполнение расчетов, написание статьи.

В.В. Бесхижко — сбор данных и анализ данных, корректировка расчетов, редактирование статьи.

А.И. Ермаков — теоретический анализ, анализ результатов расчета, редактирование статьи.

Yulia Beskhizhko — data collection and analysis of materials, developed the article concept, performing calculations, writing the article.

Vladislav Beskhizhko — data collection and analysis of materials, adjustment of calculations, redacted the article.

Alexander Ermakov — theoretical analysis, analysis of calculation results, redacted the article.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Юлия Владиславовна Бесхижко* — руководитель направления, ООО «Морнефтегазпроект» 117246, Россия, г. Москва, ул. Херсонская, д. 43 к. 3 E-mail: yulia-beskhizhko@yandex.ru

Владислав Валерьевич Бесхижко — кандидат технических наук, главный эксперт, ООО «Морнефтегазпроект» 117246, Россия, г. Москва, ул. Херсонская, д. 43 к. 3. E-mail: beskhizhko@yandex.ru

Александр Иванович Ермаков — доктор технических наук, профессор, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина 119991, Россия, г. Москва, проспект Ленинский, д. 65, к. 1. E-mail: alexanderie@yandex.ru

Yulia V. Beskhizhko* — Technical manager, "Morneftegazproject" LLC 43, bld. 3, Khersonskaya str., 117246, Moscow, Russia. E-mail: yulia-beskhizhko@yandex.ru

Vladislav V. Beskhizhko Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, "Morneftegazproject" LLC. 43, bld. 3, Khersonskaya str., 117246, Moscow, Russia. E-mail: beskhizhko@yandex.ru

Alexander I. Ermakov Dr. Sci. (Techn.), Professor of National University of Oil and Gas "Gubkin University" 65, Leninsky Prospekt, 119991, Moscow, Russia. E-mail: alexanderie@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author