

УДК 622.276.04

Анализ возможных ледовых воздействий на ледостойкое сооружение в районе месторождения Каменномыское-море

Г.С. Оганов¹, И.Б. Митрофанов¹, А.М. Карпов^{1*}, М.М. Карулина², Е.Б. Карулин², И.Л. Благовидова³, А.С. Тертышникова³

¹ ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект», Российская Федерация, 660075, г. Красноярск, ул. Маерчака, д. 10

² ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Российская Федерация, 196158, г. Санкт-Петербург, ш. Московское, д. 44

³ АО «ЦКБ «Коралл» Российская Федерация, 299028, г. Севастополь, ул. Репина, д. 1

* E-mail: a.karpov@krskgazprom-ngp.ru

Тезисы. Освоение газового месторождения Каменномыское-море будет производиться с помощью ледостойкой стационарной буровой платформы и трех блок-кондукторов. Район расположения месторождения отличается сложными природными условиями: малые глубины сочетаются с тяжелой ледовой обстановкой и значительными колебаниями уровня воды как в безледный, так и в ледовый периоды. В статье рассмотрены особенности ледовых условий месторождения Каменномыское-море и возможные сценарии взаимодействия ледяных образований с сооружениями, а также выполнен сравнительный анализ применимости расчетных методик для выбранных сценариев взаимодействия и представлены оценки глобальных ледовых нагрузок.

Ключевые слова: газовое месторождение Каменномыское-море, ледостойкая стационарная платформа, блок-кондуктор, ледовые условия, сценарии взаимодействия, глобальные ледовые нагрузки.

Газовое месторождение Каменномыское-море располагается в акватории Обской губы Карского моря в районе мыса Каменный (рис. 1). Регион отличается сложными природными условиями: малые глубины (6...15 м) сочетаются с тяжелой ледовой обстановкой (длительность ледового периода – до 10 месяцев, толщина льда – до 2,5...3,0 м) и значительными колебаниями уровня воды как в безледный, так и в ледовый периоды.

Освоение месторождения будет производиться с помощью ледостойкой стационарной буровой платформы (ЛСП «А») и трех блок-кондукторов (рис. 2). Опорный блок ЛСП «А» представляет собой протяженное сооружение с максимальными размерами по основанию 139,2×69,0 м и наклонными боковыми гранями в ледорезной части платформы. Угол наклона граней к горизонту составляет 51° (рис. 3).

Для обзора природных условий в районе установки ЛСП «А» использованы технические отчеты Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ), содержащие анализ архивных материалов гидрометеорологических наблюдений и результаты численного моделирования параметров ледовой обстановки, а также результаты выполненных в апреле – июле 2014 г. инженерно-гидрометеорологических и ледовых изысканий на акватории Обской губы в районе м. Каменного.

В южной части Обской губы в районе м. Каменного можно отметить следующие стадии присутствия ледяного покрова и характерные для них явления:

- *начало ледообразования* происходит в октябре и сопровождается появлением первичных форм плавучего льда. Дрейф льда осуществляется преимущественно под действием ветра и определяется его направлением и силой;

- *образование припая* происходит в среднем в первой декаде ноября. При этом первичные формы льда перерастают в ледяной заберег, а затем в припай, занимая всю акваторию. Возможен взлом припая, образование торосов и стамух;

- *интенсивное разрушение (вскрытие)* ледяного покрова в Обской губе происходит под комплексным воздействием гидрометеорологических факторов и начинается с перехода температуры воздуха к положительным значениям,

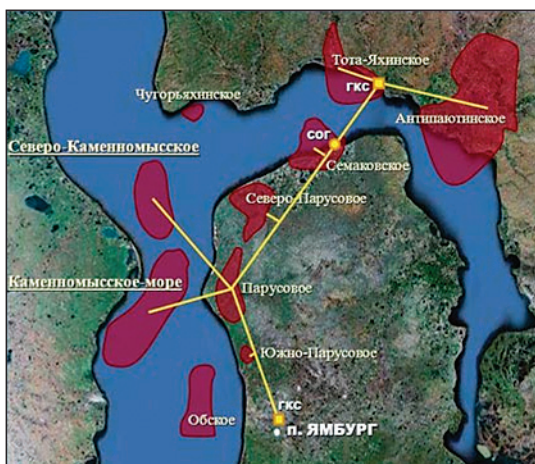


Рис. 1. Расположение месторождения Камennomысское-море:
ГКС – газокompрессионная станция;
СОГ – станция очистки газа

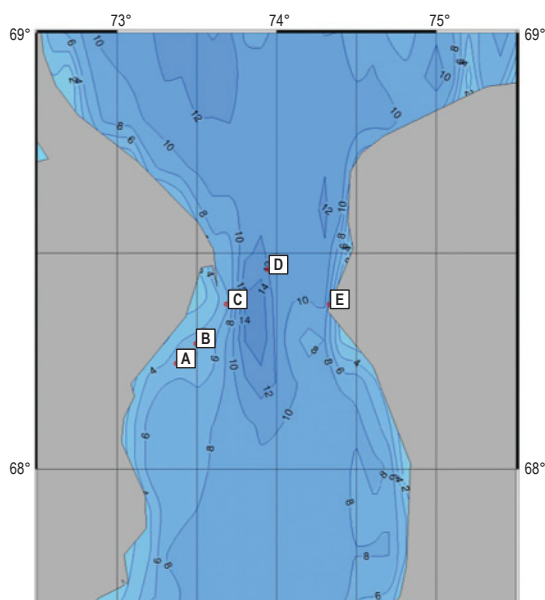


Рис. 2. Расположение объектов обустройства месторождения Камennomысское-море (район м. Каменного в Обской губе):
А – платформа ЛСП «А»; В, С и D – блоки-кондукторы; E – точка выхода подводных трубопроводов на берег

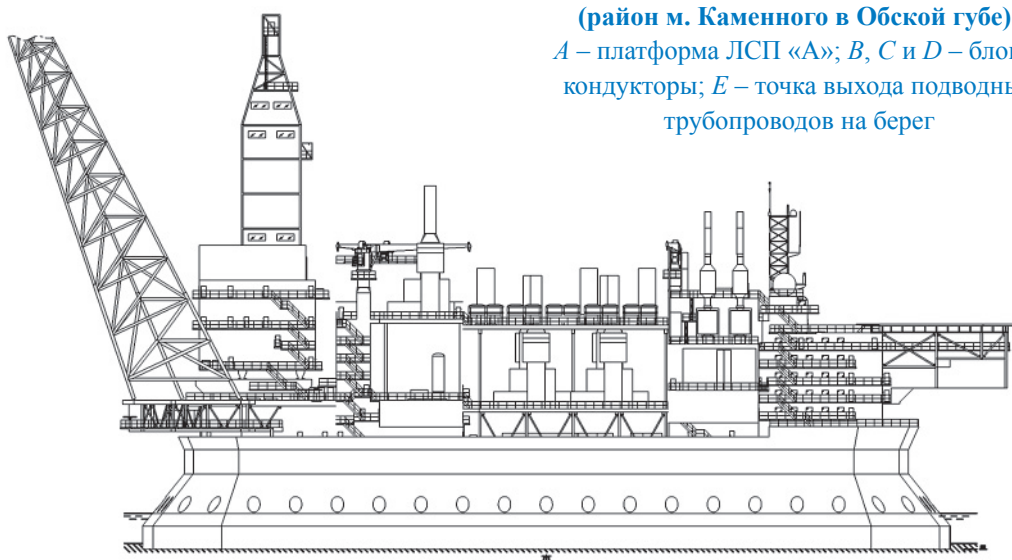


Рис. 3. ЛСП «А», вид сбоку

по средним многолетним данным, в первой декаде июня. Взлом припая в районе м. Каменного в соответствии с этими же данными в среднем наблюдается в третьей декаде июня и заканчивается к началу первой декады июля. В этот период происходит дрейф сплоченного льда (9...10 баллов по шкале сплоченности) в основном под действием стоковых течений и преобладающих ветров южных направлений;

- полное очищение ото льда акватории Обской губы в рассматриваемом регионе происходит, по средним многолетним наблюдениям, во второй декаде июля.

Таким образом, присутствие ледяных образований в точке установки ЛСП «А» наблюдается в среднем с октября по июль. Лед в районе м. Каменного пресный. Средние и экстремальные толщины льда, по результатам измерений в период 1950–1994 гг., приведены в табл. 1.

Натурные измерения прочности льда, выполненные в рамках экспедиции ААНИИ в районе м. Каменного в апреле 2014 г., позволили получить следующие оценки крупномасштабной прочности льда, МПа:

- при сжатии параллельно поверхности ледяного покрова – 2,27;
- при изгибе – 0,78.

Типичной чертой ледяного покрова Обской губы, и в особенности западного побережья, является наличие протяженных гряд торосов, распространяющихся с севера на юг и повторяющих в общих чертах конфигурацию береговой линии. Расстояние между такими грядами составляет 1...2 км и увеличивается по мере удаления от берега до 5...7 км. Такие «магистральные» гряды торосов сопровождаются, как правило, трещиной, которая проходит в 5...10 м от гряды.

Характеристики дрейфа ледяного покрова в точке установки ЛСП «А» определяются ветром и течением. При этом анализ характеристик дрейфа буев, установленных на ледяном покрове в апреле 2014 г., и данных метеостанции показал, что дрейф ледяных образований в данном районе находится в прямой зависимости от направления и скорости преимущественно дующего над акваторией ветра.

Роза дрейфа имеет ассиметричную форму с преобладающими северными направлениями

распространения дрейфа. Наиболее часто повторяющимися направлениями являются северное, северо-северо-восточное, северо-северо-западное, юго-юго-восточное, юго-юго-западное и южное. В среднем скорость дрейфа по модулю достигала значений 0,15...0,16 м/с при дрейфе в северо-северо-западном и северо-западном направлениях. Максимальные значения скорости составляли 0,49...0,62 м/с при северо-северо-западном направлении распространения льда.

Колебания уровня воды в исследуемом районе м. Каменного определяются приливами и ходом атмосферного давления в месте наблюдения. Приливы носят полусуточный характер, а колебания атмосферного давления имеют более продолжительный период. Характер изменения уровня воды при наличии ледяного покрова можно проследить по данным экспедиционных наблюдений в рассматриваемой акватории (рис. 4). Размах колебаний уровня в течение суток может достигать 0,3 м (см. рис. 4б,

Таблица 1

Средние и экстремальные толщины льда на конец месяца (период 1950–1994 гг.), м

Толщина льда	Месяц								
	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	
Средняя	0,21	0,63	0,94	1,24	1,43	1,60	1,67	1,61	
Минимальная	0,08	0,27	0,57	0,86	0,99	1,08	1,10	1,10	
Максимальная	0,38	0,93	1,38	1,64	2,02	2,10	2,11	2,35	

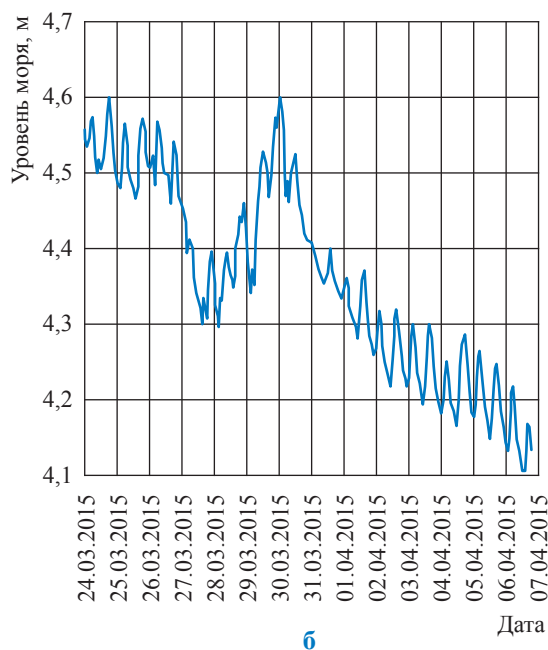
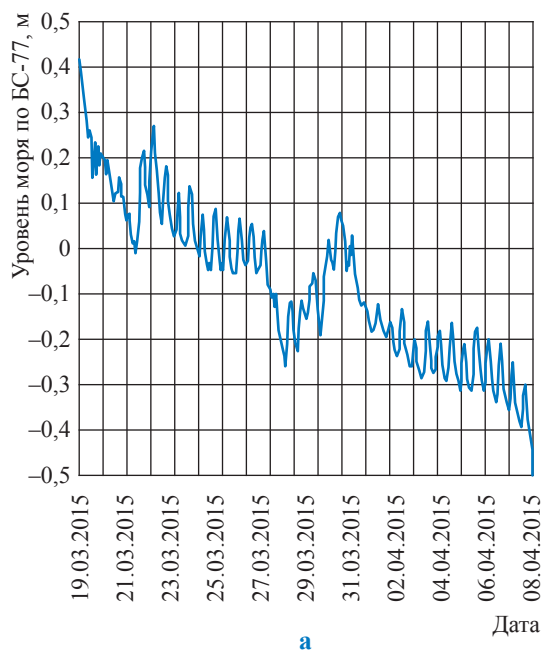


Рис. 4. Ход уровня воды, по результатам измерений в период с 19 марта по 8 апреля 2015 г.: а – м. Каменный; б – район постановки ЛСП «А». БС-77 – балтийская система высот, редакция 1977 г.

район постановки ЛСП «А» с 27 по 28 марта), а за период наблюдений составил:

- для м. Каменного 0,92 м за 19 дней;
- для района постановки ЛСП «А» 0,51 м за 15 дней.

На основании информации о ледовом режиме Обской губы сценарии взаимодействия платформы с ледяными образованиями целесообразно рассмотреть во временной последовательности, а именно взаимодействие:

1) с начальными формами образующегося льда;

2) дрейфующими ледяными полями ровного и торосистого льда в осенне-зимний период перед становлением припая;

3) неокрепшим припаем в начале зимнего периода, когда еще возможны его взлом и подвижки;

4) установившимся (неподвижным) припаем в зимний период (в январе-мае);

5) припаем в весенний период перед его взломом;

6) дрейфующими ледяными полями, образующимися в весенне-летний период после взлома припая.

Ледообразование в акватории начинается с появления первичных плавучих форм льда в виде ледяного сала, игл, шуги, которые дрейфуют в зависимости от направления и скорости ветра. Очевидно, что для начальных видов льда характерны малая толщина и небольшая прочность. Поэтому взаимодействие платформы с начальными формами льда интереса не представляет ввиду несущественности возникающих нагрузок.

В ноябре с появлением однолетних тонких льдов на акватории начинается активный процесс торосения льда. Плавучий лед под воздействием ветра и течений дрейфует, при этом в ряде случаев претерпевает сжатие, приводящее к его деформации, т.е. разрушению и нагромождению, а значит, и образованию торосов. Очевидно, что сначала ровный плавучий лед, а затем и образовавшиеся торосы будут взаимодействовать с ЛСП «А», причем платформа послужит преградой для движения льда и инициирует образование новых торосов и стамух.

Характер взаимодействия с дрейфующими ледяными полями в осенне-зимний период зависит от направления, скорости и длительности периода дрейфа ледяных образований. Учитывая значительные габаритные размеры платформы,

а также малую глубину воды, с большой долей вероятности можно говорить о неизбежности нагромождения перед платформой битого льда, образующегося при разрушении льдин вначале о борт платформы, а затем при взаимодействии льдин между собой на внешней границе нагромождения битого льда у борта. При указанном характере взаимодействия нагрузка на платформу может соответствовать непосредственно нагрузке от ровного ледяного поля, нагрузке от тороса (если воздействует торосистое поле) или нагрузке, которая будет аккумулирована растущим перед платформой нагромождением льда вплоть до момента касания им дна. После касания льдом грунта благодаря возникающим силам трения нагрузка на платформу более не увеличивается.

Неокрепший припай в начале зимнего периода в силу разных причин, чаще всего сильного ветра, может быть взломан. Образующиеся при этом ледяные поля будут взаимодействовать с платформой так, как описано выше.

С января до мая вся акватория Обской губы покрыта мощным устойчивым припаем. В весенний период перед взломом припая лед отличается несколько большей толщиной, однако значительно меньшей прочностью, чем зимой. В дальнейшем с повышением температуры воздуха и воды прочность льда начинает быстро снижаться, и при освобождении акватории ото льда воздействие полей дрейфующего льда не приводит к возникновению значительных глобальных нагрузок на платформу.

Таким образом, анализ ледовой обстановки в данном регионе указывает на необходимость изучения следующих сценариев ледового воздействия на ЛСП «А»:

- воздействие дрейфующего льда (ровного и гряд торосов) в период становления припая (ноябрь – декабрь);
- подвижки льда в период устойчивого припая и достижения значительной толщины льда (конец апреля – начало мая);
- подвижки льда перед взломом припая при максимальной толщине льда (конец мая – начало июня);
- воздействие дрейфующего битого льда – заторных масс (июнь).

Данные о ледовом режиме в месте установки ЛСП, в частности достаточно существенные колебания уровня воды, позволяют исключить сценарий вмерзания опорного блока в ледяной покров с последующей подвижкой ледяного

поля. Этот сценарий не рассматривается как определяющий проектные уровни ледовых нагрузок ЛСП «А».

Конфигурация и расположение ЛСП «А» относительно берегов в Обской губе позволяет также не рассматривать сценарий глобального термического воздействия льда на опорный блок, поскольку отмечается наличие магистральной трещины в ледяном покрове, идущей от м. Каменного к порту Новому (рис. 5).

ЛСП «А» на акватории располагается вдоль губы. Анализ ледовой обстановки в Обской губе показывает, что под действием ветров возможно смещение ледяного покрова в различных направлениях, в том числе и поперечном. Поэтому рассматривается ледовое воздействие как на широкую, так и на узкую стороны опорного блока (рис. 6).

Также следует отметить, что при определении ледовых нагрузок отдельно не рассматривались сценарии «пределной движущей силы» и «пределной кинетической энергии», поскольку суммарные размеры ледяных полей

охватывают практически всю прилегающую акваторию Обской губы, что составляет значительную площадь. Таким образом, под воздействием на ледяной покров внешних факторов (ветра, течения) реализуется сценарий разрушения льда по всей эффективной ширине опорного блока («пределного напряжения»).

Оценка уровня глобальных ледовых нагрузок от ровного и торосистого льда выполнена в соответствии с рекомендациями международного стандарта ISO 19906:2010¹. Выбор этого нормативного документа обусловлен следующими причинами.

1. ISO 19906:2010 предлагает современные методы определения ледовых нагрузок, отвечающие мировому уровню знаний по этому вопросу. В частности, для определения ледовых нагрузок от дрейфующего льда на сооружения с протяженной наклонной гранью рекомендуется использовать апробированные методы Кроасдейла (нагрузки от ровного льда и консолидированного слоя тороса) и Меллора – Долгополова (нагрузки от кия тороса).

2. Правила Российского морского регистра судоходства² не предусматривают определения ледовых нагрузок от дрейфующего льда на рассматриваемый тип опорного блока (сооружения с протяженной наклонной гранью).

3. Предложенный в отечественном нормативном документе СП 38.13330.2012³ метод определения глобальных ледовых нагрузок от ровного льда на сооружения с протяженной наклонной гранью содержит многочисленные неточности по сравнению с оригинальной методикой [1, 2], на базе которой разработан приведенный в Своде правил метод. При этом упомянутая оригинальная методика базируется на выполнении расчетов по методу Кроасдейла, что совпадает с рекомендациями ISO 19906.

4. СП 38.13330.2012 использован для оценки нагрузок от кия и паруса тороса с целью сопоставления полученных суммарных

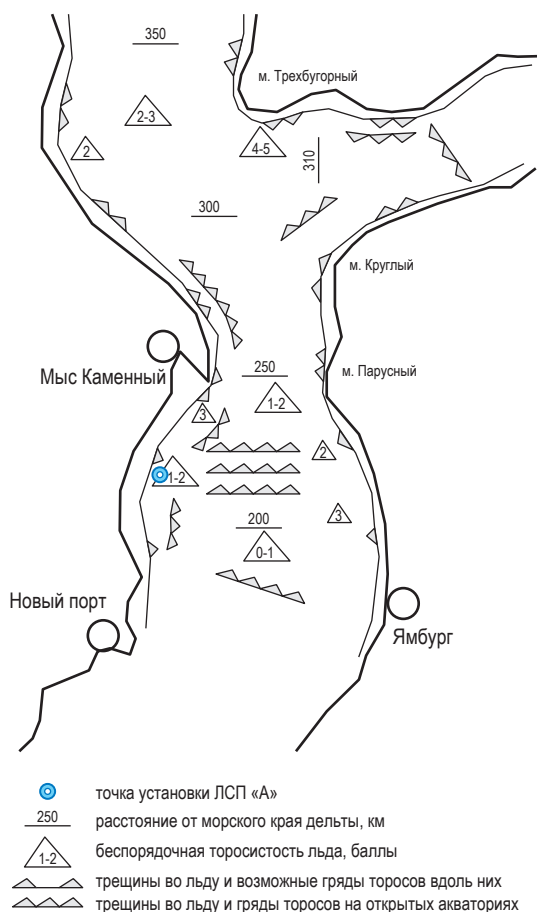


Рис. 5. Схема торосистых образований у слияния Обской и Тазовской губ

¹ ISO 19906 – Petroleum and natural gas industries. – Arctic offshore structure. International Organization for Standardization. ISO TC 67/SC 7, Secretariat: BSI, 443 p.

² НД 2-020201-012. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. – СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2014. – 483 л.

³ СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82*. – М.: Минрегион России, 2014.

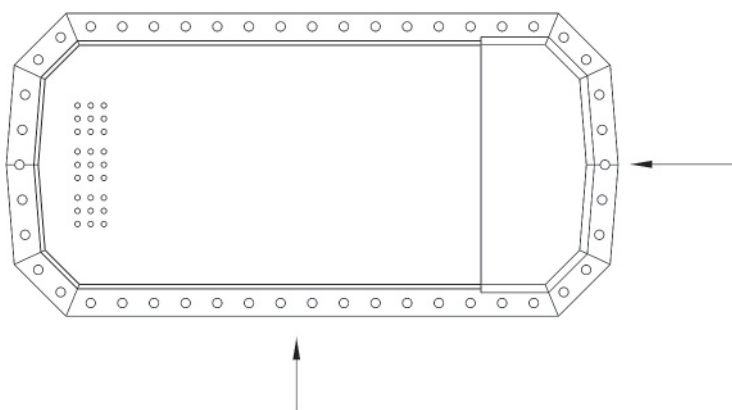


Рис. 6. ЛСП «А»: направления действия ледовой нагрузки

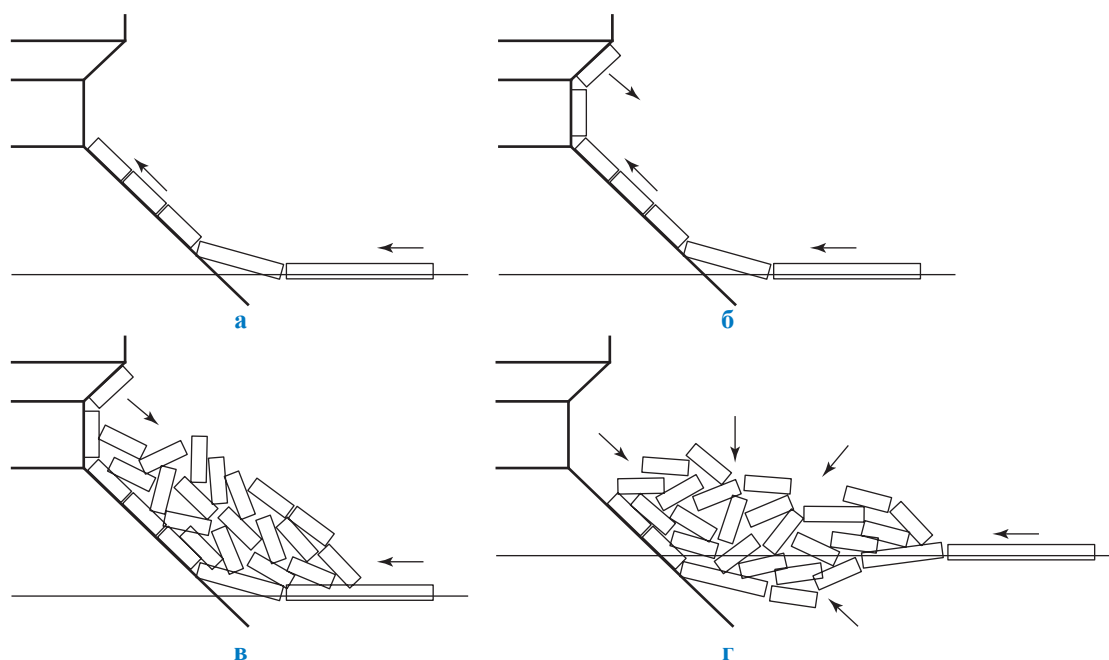


Рис. 7. Схема взаимодействия ледостойкой платформы с плоскими наклонными гранями и дрейфующего ровного льда (модель Кроасдейла): а – разрушение изгибом и наползание блоков льда; б – опрокидывание блоков льда на ледяное поле; в – формирование надводного нагромождения; г – провал нагромождения и повторение цикла

значений с нагрузкой от кия тороса, определенной в соответствии с ISO 19906.

5. Определение нагрузок от движущихся масс битого льда (заторных масс) выполнено в соответствии с СП 38.13330.2012.

Определение нагрузок от ровного льда выполнено на основании метода Кроасдейла [3]. При взаимодействии наклонной поверхности с ледяной пластиной трещинообразование при изгибе ледяного покрова может быть описано с использованием аппарата теории изгиба балки, лежащей на упругом (винклеровском) основании. Метод Кроасдейла учитывает трехмерные эффекты воздействия ледяного

покрова, а также наличие ледяных обломков на поверхности конструкции (рис. 7).

На рис. 8 представлены расчетные зависимости глобальных горизонтальных ледовых сил, действующих на широкую и узкую грани платформы со стороны ровного дрейфующего льда и консолидированной части дрейфующих торосов, от высоты нагромождения обломков льда, формирующегося перед опорным блоком. Полученные для перечисленных расчетных сценариев значения глобальных ледовых нагрузок приведены в табл. 2.

В конце июня возможен вынос масс битого льда, нагрузка от которых на широкой стороне

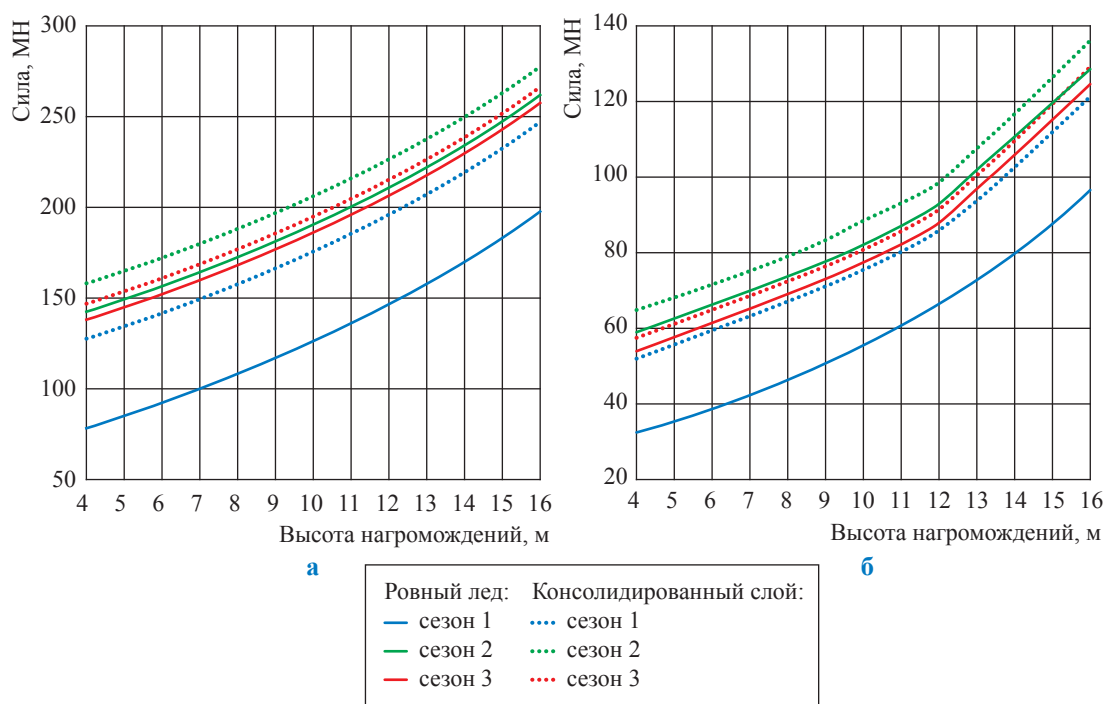


Рис. 8. Зависимость горизонтальной ледовой силы, действующей на опорный блок, от высоты нагромождения обломков льда перед ним: а – воздействие на широкую сторону опорного блока; б – воздействие на узкую сторону опорного блока (см. рис. 6)

Таблица 2

Глобальные ледовые нагрузки на опорный блок ЛСП «А», МН, широкая / узкая стороны блока

Проекция силы	Сезон					
	ноябрь – декабрь		апрель – май		май – июнь	
	Ровный лед	Торос	Ровный лед	Торос	Ровный лед	Торос
Горизонтальная	148/66	221/98	212/93	248/109	208/88	237/102
Вертикальная	87/39	179/80	171/75	201/88	168/71	192/82

опорного блока может составить 184 МН, на узкой – 77 МН.

В соответствии с результатами расчетов максимальные значения глобальных ледовых сил можно ожидать при подвижках ледяного покрова в апреле – мае. В этот период модули нагрузки в горизонтальной и вертикальной проекциях составят соответственно: на широкую грань опорного блока – 248 и 201 МН; на узкую – 109 и 88 МН.

Таким образом, на основании анализа информации о гидрометеорологическом и ледовом режимах вблизи м. Каменного выявлены потенциальные сценарии ледового воздействия на ЛСП «А», наиболее неблагоприятные с точки зрения уровня глобальных ледовых нагрузок.

Следует отметить, что основной особенностью ледового режима в точке установки ЛСП «А» является наличие обширных по площади полей ровного и торосистого льда, подвижка и дрейф которых, преимущественно под действием ветра, возможны в любых направлениях в зимний период.

Список литературы

1. Карулина М.М. Метод оценки глобальных ледовых нагрузок на широкие сооружения с плоской наклонной гранью / М.М. Карулина // Труды Крыловского государственного научного центра. – 2015. – Вып. 1 (370). – С. 117–124.
2. Karulin E.B. Ice model tests of a caisson platform in shallow water / E.B. Karulin, M.M. Karulina, L.B. Blagovidov // Journal IJOPE. – December, 2007. – Т. 17. – № 4. – <http://legacy.isope.org/publications/journals/ijope-17-4/abst-17-4-p270-RF-38-Karulin.pdf>
3. Croasdale K. A method for the calculation of sheet ice loads on sloping structures / K. Croasdale, A. Cammaert, M. Metge // Proceedings of the IAHR International Symposium on Ice. – Trondheim, Norway, 1994. – С. 874–881.

Analysis of possible ice exposures to an ice-resistant structure in the area of Kamennomyskoye-more field

G.S. Oganov¹, I.B. Mitrofanov¹, A.M. Karpov^{1*}, M.M. Karulina², Ye.B. Karulin², I.L. Blagovidova³, A.S. Tertyshnikova³

¹ Krasnoyarskgazprom Neftegazproyekt LLC, Bld. 10, Mayerchaka street, Krasnoyarsk, 660075, Russian Federation

² “Krylov State Research Center” federal state unitary enterprise, Bld. 44, Moskovskoe shosse, St. Petersburg, 196158, Russian Federation

³ Central Design Bureau “Corall” JSC, Bld. 1, Repina street, Sevastopol, 299028, Russian Federation

* E-mail: a.karpov@krskgazprom-ngp.ru

Abstract. Kamennomyskoye-more gas field will be developed by means of an ice-resistant fixed platform and three conductor-supported platforms. Location area of this field is notable for difficult environment: shallow depths are combined with heavy ice conditions and considerable fluctuations of water levels either in ice-free, or in ice seasons. The article reveals specific ice conditions of Kamennomyskoye-more field, and possible scenarios of interactions between ice features and constructions. There are also comparative analysis of calculation procedures applicability for selected scenarios, and estimations of global ice loads.

Keywords: Kamennomyskoye-more gas field, ice-resistant fixed platform, conductor-supported platform, ice conditions, scenarios of interaction, global ice loads.

References

1. KARULINA, M.M. Method of estimation of global ice loads on wide structures with flat sloped side [Metod otsenki globalnykh ledovykh nagruzok na shirokiye sooruzheniya s ploskoy naklonnoy granyu]. *Transactions of the Krylov State Research Center* 2015, is. 1(370), pp. 117–124. ISSN 2542-2324. (Russ.).
2. KARULIN, E.B., M.M. KARULINA, L.B. BLAGOVIDOV. Ice model tests of a caisson platform in shallow water. *Journal IJOPE* [online]. December, 2007, vol. 17, no. 4. ISSN 1053-5381. Available from: <http://legacy.isope.org/publications/journals/ijope-17-4/abst-17-4-p270-RF-38-Karulin.pdf>
3. CROASDALE, K., A. CAMMAERT, M. METGE. A method for the calculation of sheet ice loads on sloping structures. In: *Proc. of the IAHR International Symposium on Ice. Trondheim, Norway, 1994.*, pp. 874–881.