

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-762-769

DETERMINATION OF ICE LOADS IN DESIGNING SELF-ELEVATING DRILLING UNITS

I. L. Blagovidova

CDB «Corall» JSC, Sevastopol, Russian Federation

Taking into account challenges associated with research and development of offshore oil/gas fields in Arctic seas of the Russian Federation, a possibility of using Self-Elevating Drilling Units (SEDU's) at those fields is considered. SEDU operating experience indicates that in frozen water areas, SEDU can occur in abnormal situations related to abrupt and fast ice formation. Occurrence of such situations is actually confirmed by the incident of Project 1540 SEDU operated in the Sea of Azov. In case of operating in Arctic seas, it is generally desirable to prolong SEDU operation period by 1.5 to 2 months due to a possible operation in brash ice or in thin sheet ice at earlier stages of ice formation. To meet that challenge, CDB Corall JSC has performed a number of calculations of ice loads acted on trussed legs of three-legged SEDU, and model tests have been carried out at Krylov State Research Centre as well. Theoretical estimations have been fulfilled using semi-empirical procedures generally applied to estimate resistance of broken ice to a moving vessel, and using methods of estimating ice load based on consideration of broken ice as a loose medium. Unfortunately, the difference between the calculated results reached as much as 200%. Therefore, model tests were carried out to obtain more accurate values of ice loads. Maximal calculated values are close to model tests results. The results of theoretical calculations and model tests indicated the real possibility to provide strength of SEDU's trussed legs in brash ice or thin sheet ice with thickness of about 0.35 m.

Keywords: Self-Elevating Drilling Unit, leg, ice load, broken ice, sheet ice, model test.

For citation:

Blagovidova, Irina L. "Determination of ice loads in designing self-elevating drilling units." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.4 (2018): 762–769. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-762-769.

УДК 622.242.4; 624.042.13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛЕДОВЫХ НАГРУЗОК ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ САМОПОДЪЕМНЫХ ПЛАВУЧИХ БУРОВЫХ УСТАНОВОК

И. Л. Благовидова

АО «ЦКБ «Коралл», Севастополь, Российская Федерация

Учитывая проблемы разведки и эксплуатации морских нефтегазовых месторождений в арктических морях России, рассмотрена возможность использования в них самоподъемных плавучих буровых установок (СПБУ). Опыт эксплуатации СПБУ показывает, что в замерзающих акваториях они могут попасть в нештатные ситуации, связанные с ранним и быстрым ледообразованием. Реальность таких ситуаций подтверждается, например, ситуацией с СПБУ пр. 1540 в Азовском море. При работе в Арктических морях вообще желательно продлить время эксплуатации СПБУ на 1,5 – 2 мес. за счет возможности работы в мелкобитом или тонком ровном льду в начальных стадиях ледообразования. Для возможности решения данной проблемы в АО «ЦКБ «Коралл» была проведена серия расчетов возможных ледовых нагрузок на ферменные опорные колонны трехопорной СПБУ, а также выполнены модельные испытания в ледовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Теоретические расчеты были выполнены по полуэмпирическим методикам, применяемым обычно для оценки сопротивления битого льда движению судна, а также по методам оценки ледовой нагрузки, основанным на представлении битого льда как сыпучей среды. К сожалению, разница в расчетах составила до 200 %, поэтому для более точного определения ледовых нагрузок были проведены модельные испытания. Максимальные значения расчетных

величин близки к результатам модельных испытаний. Результаты теоретических расчетов и модельных испытаний показали реальную возможность обеспечения прочности ферменных опорных колонн СПБУ в мелкобитом или тонком ровном льду толщиной $\sim 0,35$ м.

Ключевые слова: самоподъемная плавучая буровая установка, опорная колонна, ледовая нагрузка, битый лед, ровный лед, модельное испытание.

Для цитирования:

Благовидова И. Л. Определение ледовых нагрузок при проектировании самоподъемных плавучих буровых установок / И. Л. Благовидова // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 4. — С. 762–769. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-4-762-769.

Введение (Introduction)

Для разведки и разработки нефтегазовых сооружений на малых глубинах широко применяются самоподъемные плавучие буровые установки (СПБУ). СПБУ, как правило, не предусматриваются для работы в акваториях, покрытых льдом. Проведенный анализ гидрометеоусловий арктических морей России показал, что в этих акваториях существует устойчивый безледовый период продолжительностью в среднем 2,5 – 3 мес. Таким образом, СПБУ, специально спроектированные для проведения ускоренных буровых работ, могут успешно эксплуатироваться на арктическом шельфе в безледовый период. Тем не менее необходимо учитывать, что СПБУ могут попасть в непредвиденные обстоятельства, и эксплуатационникам надо знать, какие ледовые условия СПБУ может выдержать при окончании буровых работ и уходе с точки бурения в период начала ледообразований. Поэтому для предотвращения аварийных ситуаций, связанных с повреждением опорных колонн льдом, при проектировании СПБУ необходимо оценить ледовые нагрузки от полей ровного и битого льда. Реальная ситуация с СПБУ пр. 1540 в декабре 2002 г. в Азовском море показана на рис. 1 и 2.



Рис. 1. Реальная ледовая обстановка в декабре 2002 г. Азовское море: СПБУ пр. 1540 в ледовом плену



Рис. 2. Ледовые образования на ферменных опорах СПБУ пр. 1540

СПБУ задержалась на точке бурения до декабря 2002 г. и попала в ледовые условия после быстрого замерзания Азовского моря. После потепления она благополучно была отбуксирована на зимний отстой.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Нагрузки от битого льда на одну опору. Существует ряд нормативных документов (как российских, так и международных), регламентирующих вопросы определения нагрузок на плавучие и стационарные морские нефтегазовые сооружения, в том числе и на СПБУ:

– СП 38.13330.2012. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [1];

– «Правила классификации, постройки, оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ» Российского морского регистра судоходства [2];

– ISO 19906 Petroleum and natural gas industries — Arctic offshore structures [3].

Вопросы проектирования СПБУ изложены в документах ISO [4], [5], однако в них отсутствуют рекомендации по учету воздействия ледовых образований на ферменные конструкции и в перечисленных правилах не рассматривается взаимодействие инженерных сооружений с битым льдом. Отсутствие информации в нормативных документах связано с тем, что взаимодействие с битым льдом не является определяющим для сооружений, которые в большинстве своем должны быть способны противостоять воздействию обширных ледяных полей.

Более важную роль нагрузка от битого льда играет в судоходстве, где соотношение между тягой движительной установки конкретного судна и испытываемого им сопротивлением движению со стороны битых льдов практически определяет возможность его плавания в ледовых условиях. Изучением взаимодействия ледоколов и судов ледового плавания с битым льдом занимались Ю. Н. Алексеев [6], А. В. Бронников [7], В. И. Каштелян [8], Л. М. Ногид [9], А. Я. Рывлин [10], К. Е. Сазонов [11] и многие другие отечественные и зарубежные специалисты. В монографии [8] приведены некоторые полуэмпирические методики, позволяющие оценить сопротивление битого льда движению судна. Существует также ряд методов оценки ледовой нагрузки, основанных на представлении битого льда как сыпучей среды [11].

В АО ЦКБ «Коралл» была проведена серия расчетов ледовой нагрузки на ферменную опору СПБУ по различным методикам. Анализ полученных результатов показывает, как трудно сделать обоснованный вывод о применимости какой-либо из методик в качестве расчетной для определения нагрузки от битого льда на опорную колонну СПБУ, поскольку разница в значениях, полученных по различным методикам, составляет до 200 %, причем определить причину такого расхождения в результатах весьма проблематично. Для более точного определения ледовых нагрузок от битого льда необходимо проведение модельных испытаний объекта в ледовом опытовом бассейне. Испытания были проведены по техническому заданию и программе испытаний АО ЦКБ «Коралл» во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [12]. На рис. 3, а показан вид модели корпуса СПБУ, на рис. 3, б — вид модели опоры.

а)

б)

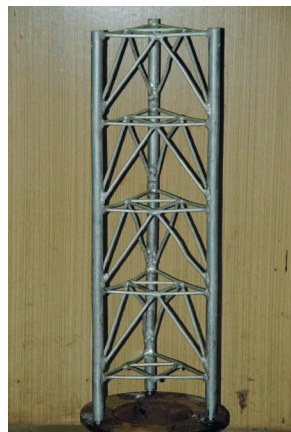
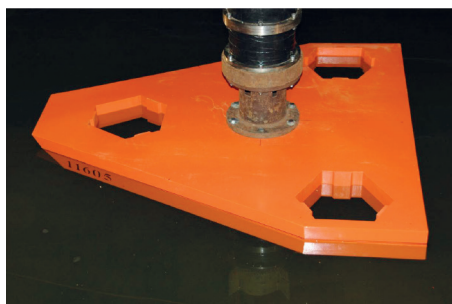


Рис. 3. Вид моделей корпуса (а) и опоры (б) СПБУ

В процессе модельных испытаний было исследовано взаимодействие ферменной трехгранной опоры СПБУ с мелкобитым льдом различной толщины и сплоченности, с различной скоростью дрейфа. Модельные испытания показали, что при взаимодействии опорной колонны СПБУ с битым льдом преимущественно происходило раздвигание обломков ледового поля моделью. На разных скоростях движения при сплоченности 90 % периодически происходило частичное скопление обломков льда перед ней и буксировка на небольшие расстояния с последующим сдвигом льда в сторону от опоры. В периоды скопления обломков перед моделью наблюдалось прорезание льда рейками опорной колонны с образованием небольшого количества ледяной крошки (рис. 4). Ледовых нагромождений во время испытаний не наблюдалось.



Рис. 4. Взаимодействие опорной колонны СПБУ с битым льдом сплоченностью 90 %

В процессе испытаний были получены максимальные значения продольной горизонтальной составляющей нагрузки от ледовых воздействий на опору и корпус СПБУ:

– опора СПБУ

битый лед $h = 0,35$ м 0,42 МН для $S = 90$ % и скорости 0,5 м/с;

битый лед $h = 0,90$ м 1,08 МН для $S = 90$ % и скорости 0,5 м/с;

– корпус СПБУ

битый лед $h = 0,35$ м 1,63 МН для $S = 90$ % и скорости 0,7 м/с;

битый лед $h = 0,90$ м 3,80 МН для $S = 90$ % и скорости 0,7 м/с.

Было проведено сравнение результатов, полученных на основе использования теоретических методик, с результатами модельных испытаний (табл. 1). Нагрузка определялась для битого льда толщиной 0,35 м и сплоченностью 90 %. Диапазон теоретических значений соответствует результатам, полученным на основе результатов использования различных методик, диапазон результатов модельных испытаний соответствует различным скоростям дрейфа льда. В большинстве теоретических методик влияние на нагрузку скорости дрейфа поля битого льда не учитывается.

Таблица 1

Нагрузка от битого льда на опору СПБУ

Направление нагрузки	Ледовая нагрузка, кН	
	теоретические расчеты	модельные испытания
на грань опоры	166 – 315	330 – 420
на угол опоры	144 – 370	270 – 360

Как видно из табл. 1, диапазон значений ледовой нагрузки, полученных с использованием теоретических методик, весьма широк, хотя максимальные значения близки к результатам, полученным на модельных испытаниях. При этом следует учитывать, что, с одной стороны, анали-

тические методы предназначены для определения нагрузок от битого льда на ледоколы и суда ледового плавания, и вопрос их применимости для ферменных конструкций остается открытым. С другой стороны, в модельных испытаниях рассмотрен достаточно специфический сценарий взаимодействия опоры СПБУ с битым льдом, когда поле дрейфующего битого льда достигает района эксплуатации установки. В реальных условиях, когда начнется процесс ледообразования в районе эксплуатации СПБУ, сценарий взаимодействия опор установки со льдом будет совершенно иным — замерзание воды произойдет вокруг опорных колонн, и ферменная конструкция вмерзнет в лед. Однако определение нагрузок, возникающих в данном случае, является достаточно сложной и неоднозначной задачей, поэтому на начальных стадиях проектирования оценку ледовых нагрузок можно произвести упомянутыми методами.

Следует также отметить, что при изучении взаимодействия молодого льда (как битого, так и сплошного поля) с инженерными сооружениями сложной задачей является определение физических характеристик ледовых образований: плотности, прочности на сжатие и на изгиб, упругости и т. д. Это связано с тем, что физические параметры молодого льда зависят от многих факторов (солености морской воды, количества пор во льду и концентрации рассола в порах, количественного соотношения между различными формами начальных льдов). Таким образом, расчетные методики, в большинстве своем рассчитанные на битый лед в канале за ледоколом, нужно применять с большой осторожностью.

Кроме того, аналитические выражения для определения нагрузки от битого льда являются полуэмпирическими или основываются на представлении битого льда как сыпучей среды. В большей части методик не учитываются многие особенности физического процесса взаимодействия битого льда с преградой, что обуславливает недостаточную точность расчетов по этим методикам. При использовании полуэмпирических формул следует учитывать, что на значения коэффициентов влияет точность проведения эксперимента. В формулах, основанных на механике сыпучих сред, фигурируют физические параметры (например, коэффициент сцепления и угол внутреннего трения), не являющиеся механическими константами сыпучей среды, а зависящие от условий и форм ее деформации. Выбор значений этих параметров оказывает непосредственное влияние на результат расчета и связан с определенными трудностями.

Нагрузки от ровного льда на одну опору. Как отмечалось ранее, в нормативных документах отсутствуют рекомендации по расчету ледовых нагрузок на ферменные конструкции. Для определения характера взаимодействия и уровня ледовых нагрузок при воздействии поля ровного льда на ферменную опору СПБУ по техническому заданию и по программе АО ЦКБ «Коралл» были проведены модельные испытания в ледовом бассейне «Крыловского государственного научного центра» (рис. 5).



Рис. 5. Взаимодействие опоры СПБУ с ровным льдом
(модельные испытания)

Одним из факторов, определяющих происходящие при взаимодействии сооружения со льдом процессы, является геометрическая форма преграды. Испытываемая в ледовом опытовом бассейне в поле ровного льда опора СПБУ представляет собой ферменную конструкцию. Ледорезной частью опоры служит система вертикальных трубчатых элементов, поэтому лед разрушается преимущественно смятием с образованием небольшого количества ледяной крошки. Характерный размер образующихся обломков ледяной крошки составляет примерно 1 – 1,5 м для натуральных условий. Ледовых нагромождений в процессе испытаний не возникало.

Максимальное значение нагрузки на опору от ровного льда толщиной 0,35 м составило 2,6 МН при скорости дрейфа 0,7 м/с. При скорости дрейфа 0,3 м/с нагрузка составила 1,9 МН. В табл. 2 приведены данные о волновых нагрузках на данную опорную конструкцию СПБУ, вычисленные по теоретическим методикам (в том числе и по правилам РМРС), и результаты, полученные в результате модельных испытаний [9].

Таблица 2

Волновая нагрузка на СПБУ

Высота волны 3 % обеспеченности, м	Волновая нагрузка, МН	
	теоретические расчеты	модельные испытания
7,0	1,66	1,52
15,3	5,71	5,14

Величины волновых нагрузок, на которые обычно рассчитываются СПБУ, превышают значения ледовых нагрузок от битого льда и сопоставимы с нагрузками от ровного льда. Поэтому, в первом приближении, можно отметить, что обеспечение прочности опорных колонн СПБУ с учетом возможных нагрузок от битого или ровного льда является реальной задачей.

Модельные испытания на определение нагрузок от течения и волнения на СПБУ выполнены по техническому заданию и программе испытаний АО ЦКБ «Коралл» в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [13].

Выводы (Summary)

1. Оценка внешних нагрузок на самоподъемные буровые установки является важной задачей проектирования. Вопросы определения нагрузок от воздействия ветра, течения и волнения являются достаточно проработанными, существует обширный материал модельных и натуральных испытаний, разработаны различные расчетные методики.

2. Определение ледовых нагрузок на СПБУ с ферменными опорами является достаточно сложной и малоизученной задачей, не имеющей на данный момент однозначного решения. Различные теоретические методы определения ледовых нагрузок дают значительно отличающиеся результаты. Более достоверные результаты можно получить с помощью модельных испытаний.

3. Учитывая динамику освоения Арктики, определение нагрузок от полей ровного и битого льда на ферменные конструкции СПБУ является актуальной проблемой, требующей всестороннего решения и внимания специалистов в данной отрасли.

4. Прочность элементов СПБУ (опорные колонны и корпус) для возможной эксплуатации в Арктических морях, должна быть обеспечена с учетом возможного попадания в ледовые условия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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, 2012. — 112 с.
2. Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2018. — 480 с.
3. ISO 19906: 2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures. — International Organization for Standardization, 2012. — 465 p.

4. ISO 19905-1: 2016 Petroleum and natural gas industries — Site-specific assessment of mobile offshore units – Part 1: Jack-ups. — International Organization for Standardization, 2016. — 320 p.
5. ISO 19905-2: 2012 Petroleum and natural gas industries — Site-specific assessment of mobile offshore units — Part 2: Jack-ups commentary and detailed sample calculation. — International Organization for Standardization, 2012. — 299 p.
6. Алексеев Ю. Н. Метод расчета сопротивления льда движению судов / Ю. Н. Алексеев, К. Е. Сазонов // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. — 1984. — № 45. — С. 28–36.
7. Бронников А. В. Динамика движения ледокола в сплошном ледяном поле / А. В. Бронников // Сб. науч. тр. НТО им. акад. А.Н. Крылова. — Л.: Судостроение, 1972. — № 174. — С. 114–128.
8. Каштелян В. И. Сопротивление льда движению судов / В. И. Каштелян, И. И. Позняк, А. Я. Рывлин. — Л.: Судостроение, 1968. — 268 с.
9. Ногид Л. М. Моделирование движения судна в сплошном ледяном поле и битых льдах / Л. М. Ногид // Тр. ЛКИ. — 1959. — Вып. XXVIII. — С. 179–185.
10. Рывлин А. Я. Испытания судов во льдах / А. Я. Рывлин, Д. Е. Хейсин. — Л.: Судостроение, 1980. — 207 с.
11. Сазонов К. Е. Теоретические основы плавания судов во льдах / К. Е. Сазонов. — СПб.: Изд-во ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. — 274 с.
12. Разработка концептуального проекта глубоководной ледостойкой самоподъемной плавучей буровой установки (ГСПБУ). Отчет о составной части опытно-конструкторской работы. Раздел итогового научно-технического отчета о результатах ОКР «Ледовые модельные испытания». — Вып. 47060. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. — 48 с.
13. Исследование мореходности и гидродинамических сил от волнения и течения, действующих на глубоководную ледостойкую самоподъемную плавучую буровую установку. Отчет. — Вып. 47093. — СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2013. — 95 с.

REFERENCES

1. Russian Federation. Set of rules SP 38.13330.2012. Loads and impacts on Hydraulic structures (from wave, ice and ships). М.: Minregion Rossii, 2012.
2. *Pravila klassifikatsii, postroiki i oborudovaniya plavuchikh burovyykh ustanovok i morskikh statsionarnykh platform*. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2018.
3. ISO 19906: 2010 Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures. International Organization for Standardization, 2012.
4. ISO 19905-1: 2016 Petroleum and natural gas industries – Site-specific assessment of mobile offshore units – Part 1: Jack-ups. International Organization for Standardization, 2016.
5. ISO 19905-2: 2012 Petroleum and natural gas industries – Site-specific assessment of mobile offshore units – Part 2: Jack-ups commentary and detailed sample calculation. International Organization for Standardization, 2012.
6. Alekseev, Yu.N., and K.E. Sazonov. “Metod rascheta soprotivleniya l'da dvizheniyu sudov.” *Voprosy sudostroeniya. Ser. Proektirovanie sudov* 45 (1984): 28–36.
7. Bronnikov, A.V. “Dinamika dvizheniya ledokola v sploshnom ledyanom pole.” *Sb. nauch. tr. / NTO im. akad. A.N. Krylova*. № 174 L.: Sudostroenie, 1972. 114–128.
8. Kashtelyan, V.I., I.I. Poznyak, and A.Ya. Ryvlin. *Soprotivlenie l'da dvizheniyu sudov*. L.: Sudostroenie, 1968.
9. Nogid, L.M. “Modelirovanie dvizheniya sudna v sploshnom ledyanom pole i bitykh l'dakh.” *Tr. LKI XXVIII* (1959): 179–185.
10. Ryvlin, A.Ya., and D.E. Kheisin. *Ispytaniya sudov vo l'dakh*. L.: Sudostroenie, 1980.
11. Sazonov, K.E. *Teoreticheskie osnovy plavaniya sudov vo l'dakh*. SPb.: TsNII im. akad. A.N. Krylova, 2010.
12. *Razrabotka kontseptual'nogo proekta glubokovodnoi ledostoikoi samopod'emnoi plavuchei burovoi ustanovki GSPBU*. Otchet o sostavnoi chasti opytно-konstruktorskoi raboty. Razdel itogovogo nauchno-tekh-nicheskogo otcheta o rezul'tatakh OKR «Ledovye model'nye ispytaniya». Vyp. 47060. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2013.

13. *Issledovanie morekhnodnosti i gidrodynamiceskikh sil ot volneniya i techeniya, deistvuyushchikh na glubokovodnuyu ledostoikuyu samopod"emnyuyu plavuchuyu burovuyu ustanovku. Otchet. Vyp. 47093. SPb.: FGUP «Krylovskii gosudarstvennyi nauchnyi tsentr», 2013.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Благовидова Ирина Львовна —
заместитель начальника отдела общего
проектирования и судовой архитектуры
АО «ЦКБ «Коралл»
299028, Российская Федерация, Севастополь,
ул. Репина, 1
e-mail: blagovidova@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Blagovidova, Irina L. —
Deputy manager of general engineering
and naval architecture department
CDB «Corall» JSC
1 Repina Str., Sevastopol, 299028,
Russian Federation
e-mail: blagovidova@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2018 г.

Received: July 16, 2018.