

DOI.org/10.5281/zenodo.399047

УДК 624.145.72:551.32

А.А. Скляров, Т.Э. Уварова

СКЛЯРОВ АЛЕКСЕЙ АНДРЕЕВИЧ – магистрант, e-mail: aleksey\_saa@mail.ru  
УВАРОВА ТАТЬЯНА ЭРИКОВНА – д.т.н., доцент, e-mail: uvarova.te@gmail.com  
Кафедра гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы  
*Дальневосточный федеральный университет*  
Суханова ул. 8, Владивосток, 690950

## Сравнительный анализ нормативных методик расчета ледовых нагрузок на конические сооружения

**Аннотация:** В последние годы в связи с открытием и началом освоения новых месторождений нефти и газа на континентальном шельфе морей Арктического и Тихоокеанского водных бассейнов и необходимостью строительства уникальных технических средств для бурения, добычи и транспортировки углеводородов интерес к решению проблем обеспечения безопасности деятельности в суровых ледовых условиях значительно возрос.

Основными факторами, определяющими выбор технических решений обустройства морских месторождений углеводородов в условиях ледовитых морей, являются параметры ледового режима, формирующие ледовые нагрузки.

Актуальность проблемы определения ледовых нагрузок и воздействий на сооружения континентального шельфа обусловлена следующими факторами: высокой динамичностью ледяного покрова и ярко выраженной его стохастичностью; недостаточной изученностью ледового режима морских акваторий и, как следствие, недостатком информации для обоснования расчетных сочетаний параметров ледового режима; недостаточной изученностью закономерностей формирования ледовых нагрузок и воздействий; отсутствием достаточного опыта строительства инженерных сооружений в подобных условиях; высокой степенью ответственности объектов строительства.

В данной работе выполнен сравнительный анализ нормативных методик расчета ледовой нагрузки на конические сооружения от ровного ледяного покрова и дана оценка возможности их применения для расчетов сооружений на шельфе российских морей.

*Ключевые слова:* конические сооружения, ледовые нагрузки, сравнительный анализ.

### Введение

Суровые ледовые условия в намеченных к освоению районах шельфа предполагают создание ледостойких сооружений различного назначения. Обеспечение надежности таких сооружений возможно лишь при решении проблемы достоверного определения действующих на них ледовых нагрузок. Исследованиями в этой области активно занимаются как в России, так и во многих зарубежных странах. На данный момент существуют множество нормативных документов, в которых определяется расчетное значение ледовой нагрузки на конические сооружения [1, 4, 6, 7, 9, 10].

Многолетний лед в шельфовом строительстве рассматривается как основная опасность, защита от него – одно из важнейших условий при проектировании морских сооружений для Аркти-

ческого региона. Воздействие ледовой массы и создаваемая в результате нагрузка – первая проблема, с которой сталкиваются компании в ходе строительства объектов в арктических условиях. Конструкция должна быть достаточно устойчивой, чтобы противодействовать внешним нагрузкам на сооружение. Соответственно, определение ледовых нагрузок, которые будет испытывать сооружение в конкретных условиях, – крайне важная часть проектирования [11].

Подобного рода работы осуществлялись и ранее, но в них рассматривались другие условия. Например [2]: в исследовании А.Б. Золотухина, посвященном основам разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и строительству морских сооружений в Арктике, предусмотрены ограничения в объеме самого сооружения. В данной же статье критерием оптимизации являются размеры встроенного резервуара (объем) для временного хранения нефти и габариты сухого дока, где предполагается строительство сооружения (например, сухой док в порту Восточный).

Целью работы является сравнительный анализ нормативных методик расчета ледовой нагрузки на конические сооружения от ровного ледяного покрова и оценка возможности их применения для расчетов сооружений на шельфе российских морей.

### Сравнительный анализ нормативных методик

В настоящее время существует несколько методов определения ледовых нагрузок на конструкции. В данной работе рассматриваются методики расчета ледовой нагрузки от действия однолетнего ровного ледяного покрова на коническое сооружение по следующим шести нормативным методикам.

1. СП 38.13330.2012 (СНиП 2.06.04-82) (Россия).
2. МРС 2014 2-020201-013 (Россия).
3. API RP\*2N-95 (США).
4. ВСН 41.88 (Россия).
5. ISO/FDIS 19906:2010 (E) Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures.
6. GL 2005, IV-Part 6 (Германия).

### Нормативные методики расчета ледовой нагрузки

СП:

$$F_{h,p} = [k_{h,1}k_{v,f}R_f h_d^2 + 10^{-6}k_{h,2}\rho g h_d d^2 + 10^{-6}k_{h,3}\rho g h_d (d^2 + d_t^2)]k_{h,4}; \quad (1)$$

$$F_{v,p} = k_{v,1}F_{h,p} + 10^{-6}k_{v,2}\rho g h_d (d^2 + d_t^2), \quad (2)$$

где  $F_{h,p}$  – горизонтальная и  $F_{v,p}$  – вертикальная составляющие нагрузки на конус.

GL:

$$F_H = C_a a_4 C_b [a_1 \sigma_f t^2 + a_2 \rho_w g t D^2] + C_v F_n \sigma_f t^2 + C_a a_4 C_r a_3 \rho_w g t (D^2 - D_T^2); \quad (3)$$

$$F_V = b_1 C_a a_4 C_b [a_1 \sigma_f t^2 + a_2 \rho_w g t D^2] + b_1 C_v F_n \sigma_f t^2 + b_1 C_a a_4 C_r a_3 \rho_w g t (D^2 - D_T^2) + b_2 \rho_w g t (D^2 - D_T^2), \quad (4)$$

где  $F_H$  – горизонтальная и  $F_V$  – вертикальная составляющие нагрузки на конус.

МРС:

$$F_{xc} = K_V [A_1 \sigma_f h^2 + A_2 \rho_{wat} g h d^2 + A_3 \rho_{wat} g p_1 h_r (D^2 + D_b^2)] A_4; \quad (5)$$

$$F_{zc} = K_V [B_1 F_{xc} + B_2 \rho_{wat} g p_1 h_r (D^2 + D_b^2)], \quad (6)$$

где  $F_{xc}$  – горизонтальная и  $F_{zc}$  – вертикальная составляющие нагрузки на конус.

ВСН представляет один метод определения нагрузок на коническую опору, отличающийся от других методов.

$$F_{v,p} = K_\beta R_f h_d^2; \quad (7)$$

$$F_{h,p} = F_{v,p} \tan(\beta + \arctg f), \quad (8)$$

где  $F_{v,p}$  – вертикальная и  $F_{h,p}$  – горизонтальная составляющие нагрузки на конус.

При изучении нормативных методик расчета, были выявлены параметры, которые влияют на расчетное значение горизонтальной и вертикальной нагрузки от однолетнего ровного льда на конические сооружения:

$$F = \left( k_{h,1}, k_{h,2}, k_{h,3}, k_{h,4}, k_{v,1}, k_{v,2}, \mu, \rho, \gamma_i, a, g, D, D_t, \right) \quad (9)$$

где  $k_{h,1}, k_{h,4}, k_{v,1}, k_{v,2}$  – коэффициенты, зависящие от коэффициента трения льда о поверхность конуса;  $\mu$  – коэффициент трения льда о поверхность конуса;  $\rho$  – плотность пресной или соленой воды;  $\gamma_i$  – плотность льда;  $a$  – угол наклона образующей конуса к горизонтали;  $g$  – ускорение свободного падения;  $R_f$  – предел прочности льда на изгиб;  $D$  – диаметр конуса по ватерлинии;  $D_t$  – диаметр верхней части конуса;  $h$  – толщина ровного льда;  $h_r$  – толщина нагромождения льда;  $V$  – скорость льда;  $E$  – модуль упругости льда,  $\nu$  – коэффициент Пуассона,  $k_v$  – коэффициент деформации льда;  $p_l$  – пористость ледяных обломков на поверхности сооружения;  $F_n$  – число Фруда;  $b$  – поперечный размер по фронту опоры на уровне действия льда;  $C_a$  – корректировка угла;  $C_b$  – корректировка силы разрушения;  $C_v$  – корректировка скорости;  $C_r$  – корректировка трения.

Анализ нормативных методик расчета ледовой нагрузки показал, что не все вышеперечисленные параметры учитываются при расчете ледовой нагрузки.

В табл. 1 приведен анализ переменных, которые необходимы для расчета ледовой нагрузки от однолетнего ровного льда на сооружения с наклонной передней гранью по основным нормативным методикам: СП 38.13330.2012 (СНиП 2.06.04-82) (Россия); MPC 2014 2-020201-013 (Россия); API RP\*2N-95 (США); ВСН 41.88 (Россия); ISO/FDIS 19906:2010 (E) Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures; GL 2005, IV-Part 6 (Германия).

Таблица 1

**Параметры, влияющие на расчетное значение ледовой нагрузки на конические сооружения от однолетнего ровного ледяного покрова**

Параметры	API	ISO	СП	GL	MPC	ВСН
Предел прочности льда на изгиб	+	+	+	+	+	+
Диаметр конуса по ватерлинии	-	+	+	+	+	-
Диаметр верха конуса	-	+	+	+	+	-
Толщина льда	+	+	+	+	+	+
Толщина нагромождения льда	+	+	-	-	+	-
Скорость льда	+	-	+	+	+	-
Модуль упругости	+	+	-	-	+	-
Коэффициент Пуассона	+	+	-	-	+	-
Ускорение свободного падения	-	+	+	+	+	-
Коэф., зависящие от коэф. трения льда	-	-	+	+	+	-
Коэф. трения льда о поверхность конуса	+	+	+	+	+	+
Плотность воды	-	+	+	+	+	-
Плотность льда	+	+	-	-	-	-
Угол наклона образующей конуса к горизонтали	+	+	+	+	+	+
Коэф. деформации льда	-	-	+	-	-	-
Пористость ледяных обломков на поверхности сооружения	-	-	-	-	+	-
Число Фруда	-	-	-	+	-	-
Поперечный размер по фронту опоры на уровне действия льда	-	-	+	-	-	+
Корректировки угла, силы разрушения, скорости, трения	-	-	-	+	-	-

СП, GL, MPC рассматривают только один метод расчета нагрузки от воздействия движущегося ровного или наслоенного ледяного поля на отдельно стоящую коническую опору с небольшим количеством различных переменных.

ISO и API предлагают несколько методов расчета ледовой нагрузки на коническое сооружение, каждый значительно отличается от методов СП, GL, MPC и BCH, что вызывает определенные трудности при сравнении учитываемых в расчете элементов.

ISO предоставляет два основных метода расчета нагрузки: метод, основанный на теории пластичности для конусов, и метод, основанный на изгибе упругой балки.

API не содержит конкретных методов, но рассматривает различные условия разрушения ледяного покрова и нагрузки, возникающие при этом разрушении: изгибание ледяного поля; продольный изгиб; раскалывание ледяного поля; разламывание и подъем гряды; обломки льда и гряды. При различных условиях учитываются различные факторы, участвующие в расчете нагрузок. Кроме того, представлены различные теории для прогнозирования ледовых сил: теория упругого изгиба балки, теория упругого изгиба клина и пластическое изгибание.

В настоящее время для расчета ледовой нагрузки на морские гидротехнические сооружения с наклонной гранью используются решения Ральстона и Кроасдейла и их модификации поля. API ссылается на методики Ральстона, Кроасдейла, Хетени, Невеля и другие, акцентируя внимание только на ключевых элементах этих методов.

Метод Ральстона:

$$R_H = [A_1 \sigma_f h^2 + A_2 \rho_i g h D^2 + A_3 \rho_i g h_R (D^2 + D_T^2)] A_4; \quad (10)$$

$$R_V = B_1 R_H + B_2 \rho_i g h_R (D^2 + D_T^2), \quad (11)$$

где  $R_H$  – горизонтальная и  $R_V$  – вертикальная составляющие нагрузки на конус.

### Сравнение расчетных нагрузок с натурными данными

В целях определения достоверности расчетных нагрузок от разных методик было проведено их сравнение с натурными замерами ледовых нагрузок на опору P31 моста Конфедерации (Канада). Усредненные натурные исследования представлены на рисунках 1 и 2 [12]. При расчетах по методикам были приняты все параметры конической опоры P31, а также средние местные ледовые параметры за февраль 2009 года. Результаты расчетов приведены в табл. 2, натурные показатели ледовой нагрузки в соответствии с рис. 1 и рис. 2 приведены в табл. 3.

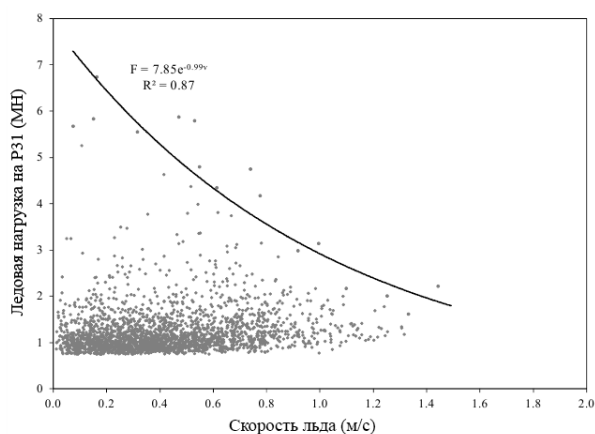


Рис. 1. Усредненные ледовые нагрузки относительно скорости льда на опоре P31.

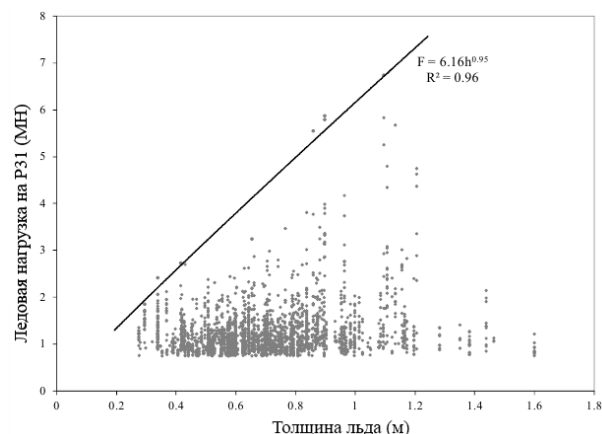


Рис. 2. Усредненные ледовые нагрузки относительно толщины льда на опоре P31.

Таблица 2

### Расчетные нагрузки на опору моста Конфедерации P31

Норматив	Fh, МН	Fv, МН	F усредненная, МН
GL	3,59	1,78	4,01
ISO	3,15	1,58	3,52
MPC	4,15	2,64	4,91
СП	1,27	0,97	1,60

**Натурные показатели нагрузки по наблюдаемым значениям**

F усредненная, МН	Fh, МН	Fv, МН
4,00	3,15	2,46

С учетом разброса нагрузок на коническую опору Р31 при принятой в расчетах скорости льда  $v = 0,9$  м/с и толщины льда  $t = 0,8$  м составляет от 0,8 до 4 МН, результаты всех методик попадают в этот диапазон. При этом расхождение расчетных параметров и наблюдаемых значений для GL составляет 2,5%, для ISO – 12%, MPC – 22,8% и СП – 60%. Таким образом, нормативные методики GL и ISO наиболее точно описывают параметры ледовой нагрузки от ровного ледяного покрова для конических сооружений. Следует заметить, что, по сравнению с GL, нормативная методика ISO охватывает большее количество параметров, влияющих на расчетное значение ледовой нагрузки на конические сооружения от однолетнего ровного ледяного покрова, что является преимуществом ее применения при оценке ледовой нагрузки.

**Задача оптимизации геометрических параметров сооружения**

Задача оптимизации геометрических параметров сооружения выполняется для условий Карского моря на основе методик: СП 38.13330.2012; MPC 2014 2-020201-013; ISO/FDIS 19906:2010(E) Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures; GL 2005, IV-Part 6.

Задача оптимизации заключалась в определении оптимальных размеров сооружения при условии временного хранения углеводородов в объеме 150 000 м<sup>3</sup> и возможности строительства сооружения в сухом доке при максимально возможном размещении сооружения габаритами 140 м (п. Восточный, Приморский край). Проектная глубина установки сооружений – 50 м.

**Исходные данные**

Карское море широко открыто к Северному Ледовитому океану и в большей части лежит на материковой отмели, поэтому оно относится к типу материковых окраинных морей и является одним из крупных морей нашей страны.

Приливы в Карском море выражены весьма отчетливо. Движение приливной волны создает приливные течения, скорость которых достигает значительных величин и может достигать до 1,5 м/с, что значительно превышает скорости постоянных течений в Карском море (0,8 м/с).

Приливные изменения уровня сравнительно невелики. По всем пунктам побережья они равны в среднем 0,5–0,8 м. Однако в Обской губе они превышают 1 м.

Сгонно-нагонные колебания уровня на материковом берегу моря больше 1 м, а в глубине заливов и губ в безледные сезоны доходят до двух и более метров. В среднем высота ветрового нагона составляет 1,4 м.

1. В самый теплый период (июль) воздух в среднем прогревается на 5–6 °С в западной части моря и на 1–2 °С – на востоке и северо-востоке. Вблизи материкового побережья воздух может прогреваться до +18 и +20 °С. В целом непродолжительное лето отмечается невысокими температурами и пасмурной погодой с большим количеством дождей. В зимний период температура воздуха может понизиться до –50 °С. Полярная ночь длится 3–4 месяца в году.
2. Частые и сильные ветры развивают значительное волнение в Карском море. Однако размеры волн кроме скорости и продолжительности ветра зависят и от ледовитости, обуславливающей длину разгона ветра. В связи с этим наиболее сильное волнение наблюдается в малоледовитые годы в конце лета–начале осени. Самую большую повторяемость имеют волны высотой 1,5–2,5 м, реже наблюдаются волны 3 и более метров, максималь-

ная высота волны около 8 м. Чаще всего сильное волнение развивается в юго-западной и северо-западной части Карского моря, обычно свободной от льда.

3. Соленость воды колеблется в большом диапазоне, так как летом южная часть Карского моря является стоком для крупнейших российских рек, в связи с чем соленость может упасть до 5 ‰, а в зимнее время достигать 20 ‰.

Суровый климат Карского моря обуславливает его полное замерзание в осенне-зимнее время и круглогодичное существование льда. Ледообразование начинается в сентябре в северных районах моря и в октябре – на юге. С октября по май почти все море покрыто льдами разного вида и возраста. Прибрежную зону занимает неравномерно развитый припай. В северо-восточной части моря неподвижный лед образует непрерывную полосу, в то время как в юго-западной части моря припай занимает небольшие площади. Зона чистой воды или молодых льдов располагается за зоной неподвижного льда.

В открытых районах моря распространены дрейфующие льды, среди которых преобладают однолетние льды местного происхождения: максимальная толщина (в мае) ровного льда 1,5–2,0 м, дрейфующих обломков льда – в среднем 0,4 м.

В море преобладает выносной дрейф, в процессе которого льды выносятся на север. Скорость дрейфа льда составляет 0,4 м/с. После взлома припая на поверхности образуются льды сплоченностью 9–10 баллов.

Основные расчетные параметры ледового режима для условий Карского моря, используемые в задаче оптимизации геометрических параметров сооружения, приведены в табл. 4.

Таблица 4

**Основные расчетные параметры ледового режима для условий Карского моря**

Характеристика ледового покрова	Значение параметра
Средняя толщина ровного однолетнего льда (май), м	1,4
Прочностные и деформационные свойства льда: средняя/максимальная прочность на одноосное сжатие образцов льда:	
- перпендикулярно поверхности намерзания, МПа;	2,06/4,66
- параллельно поверхности намерзания, МПа;	0,60/0,91
- средняя прочность на изгиб, МПа.	0,5
Средняя скорость дрейфа, м/с.	0,4
Физические свойства льда (минимум/максимум):	
- температура ровного льда, °С;	-30,0/0,0
- соленость ровного льда, ‰;	0/2
- плотность ровного льда, кг/см <sup>3</sup>	0,82/0,97

**Типы конструкций**

В настоящее время предпочтение отдается кессонным конструкциям сооружений островного типа. В качестве кессонов могут использоваться бетонные блоки, стальные кольцевые конструкции с жесткой платформой или без нее [3]. Конструкции угловых (конусных) форм позволяют сократить нагрузки на сооружение, особенно в условиях мягких грунтов. При движении льда вокруг конструкций конической формы разрушение льда происходит на изгибе. Основное преимущество конструкций данного вида в том, что лед разрушается быстрее, чем при смятии (столкновении). Большинство специалистов согласны, что конструкции угловых форм позволяют снизить общие ледовые нагрузки на сооружение на два и более порядка по сравнению с конструкциями вертикальных форм [11]. Однако при этом возможно неконтролируемое нагромождение льда вокруг опоры сооружения, что многократно увеличивает силу давления льда на нее, поэтому применение данного типа конструкций требует дополнительного обоснования.

На рис. 3 указаны типы конструкций: а) К1П – конструкция кессонного типа с прямоугольным основанием для хранения нефти и газа; б) К1Ц – аналогична К1П, но резервуар для хранения

нефти и газа имеет форму цилиндра; в) К2П – конструкция кессонного типа с наклонными гранями и встроенным в нее прямоугольным резервуаром для хранения нефти и газа; г) К2Ц – аналогична К2П, но встроенный резервуар имеет форму цилиндра; д) К3П – конструкция типа монопод, с прямоугольным основанием для хранения нефти и газа; е) К3Ц – аналогична К3П, но резервуар для хранения нефти и газа имеет форму цилиндра.

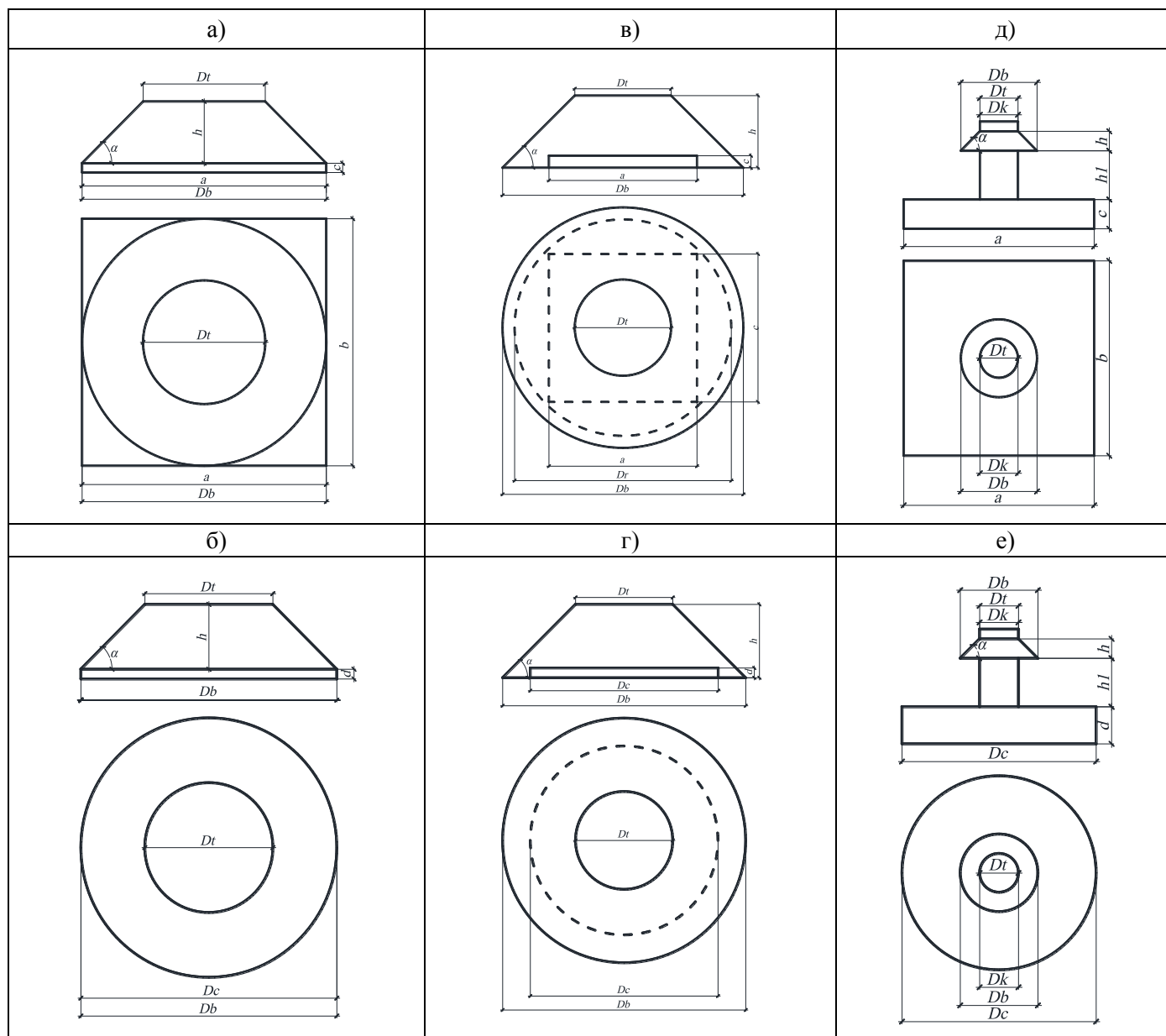


Рис. 3. Типы конструкций:  $D_t$  – диаметр верхней части конуса;  $D_b$  – диаметр нижней части конуса;  $D_c$  – диаметр цилиндрического резервуара;  $D_r$  – диаметр конуса на высоте резервуара;  $D_k$  – диаметр цилиндрической опоры;  $h$  – высота конуса;  $h_1$  – высота от резервуара до основания конуса;  $\alpha$  – угол образующей конуса к горизонтали;  $a$  – длина резервуара;  $b$  – ширина резервуара;  $c$  – высота резервуара;  $d$  – высота цилиндрического резервуара.

### Геометрические расчеты

Для конструкций К1П, К1Ц, К2П и К2Ц при фиксированной величине диаметра верхней части конуса 80 м и высоте конструкции 60 м был выполнен расчет геометрических параметров сооружения с учетом фиксированного объема для хранения углеводородов, равный 150 000 м<sup>3</sup>. Все расчеты приведены в таблицах 5–8.

Таблица 5

**Геометрические расчеты сооружения К1П**

$\alpha$ , град	$D_b$ , м	a, м	b, м	c, м	V, м <sup>3</sup>
45	160	160	160	5,9	151 040
50	147,13	147,13	147,13	7	151 530
55	136,02	136,02	136,02	8,2	151 712
60	126,2	126,2	126,2	9,5	151 301
65	117,3	117,3	117,3	11	151 352
70	109,12	109,12	109,12	12,6	150 030

Таблица 6

**Геометрические расчеты сооружения К1Ц**

$\alpha$ , град	$D_b$ , м	$D_c$ , м	d, м	V, м <sup>3</sup>
45	160	160	7,5	150 796
50	147,13	147,13	8,9	151 294
55	136,02	136,02	10,4	151 122
60	126,2	126,2	12	150 103
65	117,3	117,3	13,9	150 210
70	109,12	109,12	16,1	150 565

Таблица 7

**Геометрические расчеты сооружения К2П**

$\alpha$ , град	$D_b$ , м	a, м	b, м	c, м	V, м <sup>3</sup>
45	200	123	123	10	151 290
50	180,7	110	110	12,4	150 040
55	164,02	100	100	15	150 000
60	149,28	90	90	18,6	150 660
65	135,96	80	80	23,5	150 400
70	123,67	70	70	30,7	150 430

Таблица 8

**Геометрические расчеты сооружения К2Ц**

$\alpha$ , град	$D_b$ , м	$D_c$ , м	d, м	V, м <sup>3</sup>
45	200	175	6,3	151 532
50	180,7	150	8,5	150 207
55	164,02	140	9,8	150 859
60	149,28	130	11,4	151 314
65	135,96	120	13,3	150 419
70	123,67	110	15,8	150 152

Геометрия резервуара конструкций К3П и К3Ц не меняется с изменением угла образующей конуса и составляет: a=100 м, b=100 м, c=15 м для К3П и  $D_c = 100$  м, d = 19,1 м для К3Ц.

С учетом ограничения параметров строительства в сухом доке максимальный размер возможного размещения сооружения составляет 140 м – в соответствии с таблицами 5–8, для сооружений К1П и К1Ц оптимальный угол наклона составляет 55°; К2П и К2Ц – 65°; для К3П и К3Ц данный параметр не имеет значения, так как основание сооружения фиксировано и не ограничено углом наклона, но принимаем 55°, основываясь на процентном соотношении горизонтальной к вертикальной нагрузке.

**Расчет ледовых нагрузок на конические сооружения**

Расчеты выполнялись для всех типов конструкций с изменением угла наклона граней от 45 до 70° по четырем нормам: СП 38.13330.2012; GL 2005, IV-Part 6; MPC 2014 2-020201-013; ISO/FDIS 19906:2010(E) Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures. Форма резервуара не влияет на результаты расчета. На рис. 4 и рис. 5 представлены графики зависимостей горизонтальных и вертикальных нагрузок от угла образующей конуса для сооружений К1 по нор-

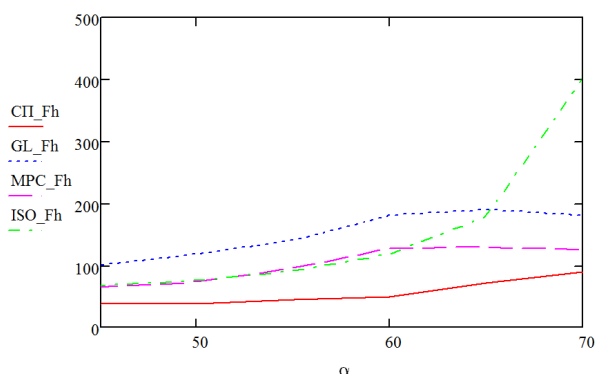


Рис. 4. Графики зависимостей горизонтальных нагрузок Fh (МН) от угла образующей конуса для сооружений К1.

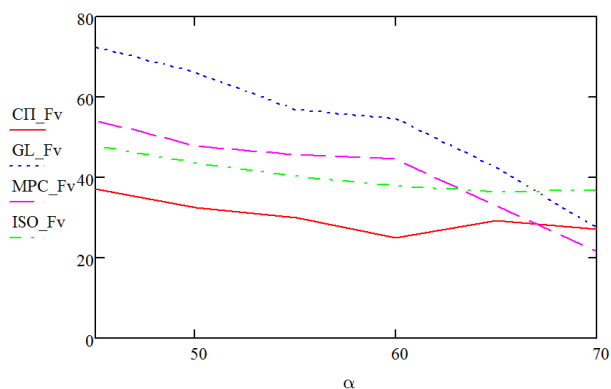


Рис. 5. Графики зависимостей вертикальных нагрузок Fv (МН) от угла образующей конуса для сооружений К1.



мативным методикам СП, GL, MPC, ISO. На рис. 6 и рис. 7 графики зависимостей для сооружений K2 по нормативным методикам СП, GL, MPC, ISO. На рис. 8 и рис. 9, соответственно, графики зависимостей для сооружений K3 по нормативным методикам: СП, GL, MPC, ISO.

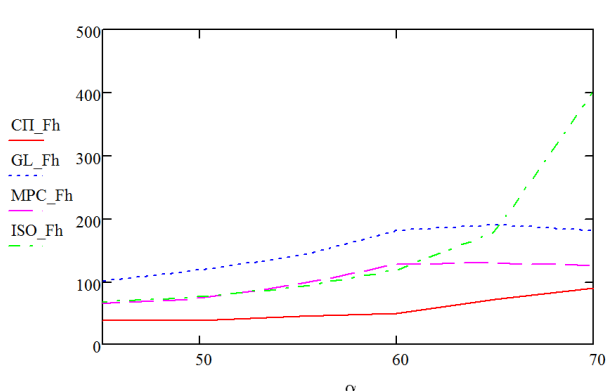


Рис. 6. Графики зависимостей горизонтальных нагрузок  $F_h$  (МН) от угла образующей конуса для сооружений K2.

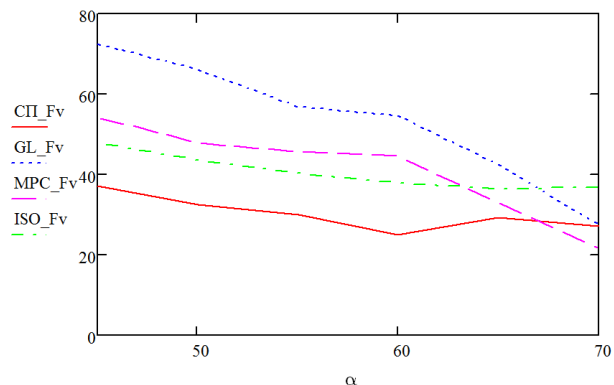


Рис. 7. Графики зависимостей вертикальных нагрузок  $F_v$  (МН) от угла образующей конуса для сооружений K2.

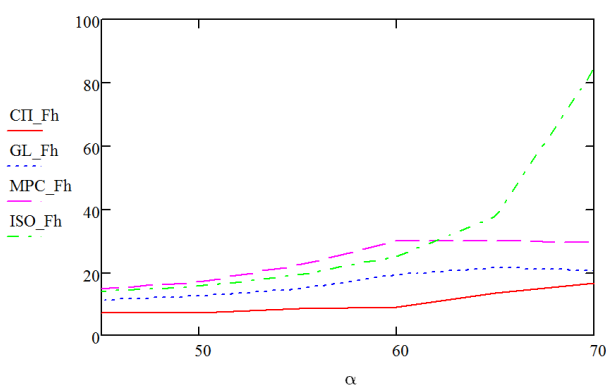


Рис. 8. Графики зависимостей горизонтальных нагрузок  $F_h$  (МН) от угла образующей конуса для сооружений K3.

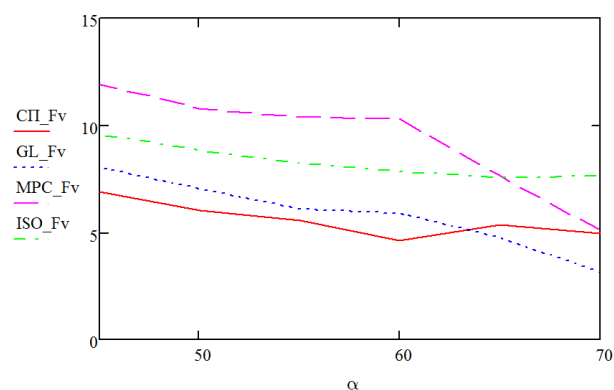


Рис. 9. Графики зависимостей вертикальных нагрузок  $F_v$  (МН) от угла образующей конуса для сооружений K3.

Результаты расчетов для оптимальных углов сооружений приведены в таблицах 9–11. Оптимальными углами считаются такие углы, при которых нижний диаметр сооружения не превышает размеры сухого дока, при этом объем резервуара для хранения нефти составляет  $150\,000\text{ м}^3$ .

Таблица 9

**Горизонтальные и вертикальные ледовые нагрузки, действующие на сооружение K1 при угле образующей конуса  $55^\circ$**

Методика	$F_h$ , МН	$F_v$ , МН	Суммарная нагрузка, МН	Процентное отношение $F_h$ к $F_v$ , %
СП	44,62	30,11	74,73	59,7/40,3
GL	139,62	56,8	196,42	71,1/28,9
MPC	95,77	45,77	141,54	67,7/32,3
ISO	91,99	40,4	132,39	69,5/30,5

Таблица 10

**Горизонтальные и вертикальные ледовые нагрузки, действующие на сооружение К2 при угле образующей конуса 65°**

Методика	F <sub>h</sub> , МН	F <sub>v</sub> , МН	Суммарная нагрузка, МН	Процентное отношение F <sub>h</sub> к F <sub>v</sub> , %
СП	72,11	29,36	101,47	71/29
GL	190,55	42,35	232,9	81,8/18,2
МРС	128,4	32,7	161,1	79,7/20,3
ISO	179,04	36,43	215,47	83,1/16,9

Таблица 11

**Горизонтальные и вертикальные ледовые нагрузки, действующие на сооружение К3 при угле образующей конуса 55°**

Методика	F <sub>h</sub> , МН	F <sub>v</sub> , МН	Суммарная нагрузка, МН	Процентное отношение F <sub>h</sub> к F <sub>v</sub> , %
СП	8,29	5,54	13,83	59,9/40,1
GL	14,86	6,07	20,93	71/29
МРС	22,42	10,4	32,82	68,3/31,7
ISO	19,08	8,27	27,35	69,8/30,2

**Заключение**

Итак, главная проблема при создании сооружений для освоения нефтегазовых месторождений на шельфе арктических морей – с увеличением глубины водоема значительно (в несколько раз) увеличивается их стоимость. При этом многообразие природных условий различных арктических районов требует принятия отдельных технических решений для каждого случая, поэтому встает вопрос оптимизации соотношений таких показателей, как надежность и экономичность технических средств, эксплуатируемых в районах со сложными ледовыми условиями.

Проведенный анализ показывает, что каждая из приведенных методик может быть использована в проектной практике. Однако следует заметить, что, с нашей точки зрения, наиболее полной и в достаточной степени достоверной (расхождение натуральных и расчетных показателей ледовой нагрузки составляет 12%) можно считать методику, предложенную в ISO/FDIS 19906:2010(E) Petroleum and natural gas industries – Arctic Offshore Structures. Данная методика не ограничивает в выборе угла образующего конуса, учитывает большое количество переменных и более гибка в выборе параметров, таких как скорость льда (не ограничена, в отличие от ВСН), коэффициент трения льда о конструкцию (в СП, МРС, GL данный параметр ограничен графиками). В отличие от других методик с помощью ISO может быть отдельно посчитана горизонтальная и вертикальная нагрузки от нагромождения льда на конической части и изгибающие ледовые нагрузки. Кроме того, эта методика одна из самых новых и разрабатывалась совместными усилиями специалистов из разных стран.

Наиболее оптимальной в конструктивном плане из рассмотренных конструкций можно считать конструкцию типа К1Ц, которая не имеет элементов, требующих дополнительных расчетов нагрузки (как К3 с цилиндрической опорой, нагрузки на которую рассчитываются по другим нормам), и при оптимальном угле образующей конуса занимает относительно небольшую площадь – при ее изготовлении легко помещается в сухом доке. Кроме того, размеры конической конструкции гораздо более вариативны, ей не требуется размещение резервуара конкретного объема для хранения нефти. Этот резервуар устанавливается непосредственно под ним. А цилиндрическая форма резервуара обтекаема и меньше подвержена нагрузкам подводного течения.

По сравнению с конструкцией К1Ц конструкции типа К2 более трудоемки с точки зрения технологии возведения и не позволяют унифицировать опорную часть конструкции, где располагается резервуар для хранения нефти. Следует отметить, что хотя на сооружение типа К3 воздействуют гораздо меньшие нагрузки, оно неприменимо для хранения больших объемов топлива. Подобные конструкции хорошо зарекомендовали себя как опорные конструкции мостов, где снижение нагрузки играет определяющую роль при их проектировании и выборе типа опоры.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 41-88 Ведомственные строительные нормы (экспериментальные) проектирования ледостойких стационарных платформ. М., 1988.
2. Золотухин А.Б., Гудместад О.Т., Ермаков А.И. и др. Основы разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и строительство морских сооружений в Арктике. М.: Нефть и газ, 2000. 770 с.
3. Ильина С.В. Проблемы при выборе типа морской стационарной платформы для работы в ледовых условиях // Технические науки в России и за рубежом: материалы междунар. науч. конф., Москва, май 2011. М.: Ваш полиграфический партнер, 2011. С. 86–91.
4. Российский морской регистр судоходства. НД № 2-020201-013: Правила классификации, постройки и оборудования плавучих буровых установок и морских стационарных платформ. СПб., 2014.
5. СНиП 2.06.04-82\* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). М., 1995.
6. СП 38.13330.2012 Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). Актуализированная редакция СНиП 2.06.04-82\*. М., 2012.
7. API RP 2N. Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions. Amer. PetroleumInst. Bulletin, Dallas, 1995.
8. Dale Karr, Bingbin Yu. Draft: FAST Ice Module Manual. Univ. of Michigan, 2015, April, pp. 26–27.
9. Germanischer Lloyd Oil and Gas GmbH. General Terms and Conditions. Hamburg edition, 2005.
10. ISO/FDIS 19906:2010(E) Petroleum and natural gas industries. Arctic Offshore Structures. International Organisation for Standardization, ISO TC 67/SC 7, 2010.
11. PRO-ARCTIC: <http://pro-arctic.ru/26/08/2012/technology/192> – 20.02.2017.
12. Shrestha N. Ice Action Database for the Confederation Bridge Piers. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Department of civil engineering Calgary, Alberta, 2012, p. 312.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE THE NEXT PAGE

## Arctic Construction and Equipment for the Ocean

DOI.org/10.5281/zenodo.399047

Sklyarov A., Uvarova T.

ALEXEY SKLYAROV, MA Student, e-mail: aleksey\_saa@mail.ru

TATIANA UVAROVA, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor,  
e-mail: uvarova.te@gmail.comDepartment of Hydraulic Engineering, the Theory of Buildings and Structures, School of Engineering  
*Far Eastern Federal University*  
8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690950**Comparative analysis of regulatory methods of calculating ice loads on conical structures**

**Abstract:** The recent discovery and the beginning of the development of oil and gas fields of the Arctic and Pacific continental shelves have necessitated the construction of unique engineering equipment to drill, extract and transport resources. In this connection, the issue of security of activities in the ice-bound conditions came up. The basic factors determining the choice of engineering solutions to deal with the offshore hydrocarbon deposits in Arctic are the parameters of the ice conditions from which the ice load results. The relevance of determining ice loads and effects on the constructions of the continental shelf is heightened by the following factors: high dynamism of the ice cover with its pronounced stochasticity, the gaps in knowledge of the ice conditions of the offshore zones, and, consequently, the lack of information to calculate the ice conditions, the not adequately studied mechanisms of the formation of ice loads and effects, the lack of experience in construction engineering in these conditions, and the high standards set to construction objects. The article presents the comparative analysis of the regulatory methods of calculating ice loads on conical structures produced by smooth ice cover and it contains the valuation of their options for constructions in the Russian shelves.

*Key words:* conical structures, ice load, comparative analysis.

## REFERENCES

1. VSN 41-88 Departmental building codes (experimental) design ice-resistant fixed platform, Moscow, 1988.
2. Zolotukhin A.B., Gudmestad O.T., Ermakov A.I., et al. Fundamentals of the development of offshore oil and gas fields and the construction of offshore structures in the Arctic. Moscow, Oil and Gas Publishing, 2000, 770 p.
3. Ilyina S.V. Problems when selecting the type of fixed offshore platforms for working in ice conditions. Engineering in Russia and abroad: Materials intern. scientific. conf., Moscow, May 2011. M., Your printing partner, 2011, pp. 86–91.
4. Russian Maritime Register of Shipping, Classification rules, construction and equipment of mobile offshore drilling units and fixed offshore platforms. ND N. 2-020201-013. St. Petersburg, 2014.
5. SNIP 2.06.04-82\* Loads and effects on the waterworks (wave, ice and from ships). M., 1995.
6. SP 38.13330.2012 Loads and effects on the waterworks (wave, ice and from ships). The updated edition of SNiP 2.06.04-82\*; M., 2013.
7. API RP 2N. Recommended practice for planning, designing and constructing structures and pipelines for Arctic conditions. Amer. PetroleumInst. Bulletin, Dallas, 1995.
8. Dale Karr, Bingbin Yu. Draft: FAST Ice Module Manual. Univ. of Michigan, 2015, April, pp. 26–27.
9. Germanischer Lloyd Oil and Gas GmbH. General Terms and Conditions. Hamburg edition, 2005.
10. ISO/FDIS 19906:2010(E) Petroleum and natural gas industries. Arctic Offshore Structures. International Organisation for Standardization, ISO TC 67/SC 7, 2010.
11. PRO-ARCTIC: <http://pro-arctic.ru/26/08/2012/technology/192> – 20.02.2017.
12. Shrestha N. Ice Action Database for the Confederation Bridge Piers. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Department of civil engineering Calgary, Alberta, 2012, p. 312.