

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ: СТРОИТЕЛЬСТВО**

**Гидротехническое строительство**

DOI.org/10.5281/zenodo.897000

УДК 626/627

А.Т. Беккер, А.Э. Фарафонов, Е.Е. Помников

БЕККЕР АЛЕКСАНДР ТЕВЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, директор Инженерной школы,  
e-mail: [bekker.at@dvfu.ru](mailto:bekker.at@dvfu.ru)

ФАРАФОНОВ АЛЕКСАНДР ЭДУАРДОВИЧ – к.т.н., доцент кафедры,  
e-mail: [farafonov.aye@dvfu.ru](mailto:farafonov.aye@dvfu.ru)

Кафедра гидротехники, теории зданий и сооружений Инженерной школы  
ПОМНИКОВ ЕГОР ЕВГЕНЬЕВИЧ – к.т.н., заведующий ледовой лабораторией  
Инженерной школы, e-mail: [pomnikov.ee@dvfu.ru](mailto:pomnikov.ee@dvfu.ru)

*Дальневосточный федеральный университет*

Суханова ул., 8, Владивосток, 690091

## Неоднородность ледяных полей

**Аннотация:** Наиболее перспективным способом освоения шельфовых месторождений является надводный, требующий строительства уникальных морских ледостойких платформ. В то же время процесс освоения северных и дальневосточных морей сдерживается недостаточной изученностью нагрузки и воздействия дрейфующего ледяного покрова на морские инженерные сооружения. При этом ледовые нагрузки, как правило, являются преобладающими и определяют их основные массогабаритные характеристики. Исследования показали, что учет пространственной неоднородности ледяного покрова в плане (в горизонтальной плоскости) позволяет значительно уточнить проектные значения ледовых нагрузок и воздействий в сторону их уменьшения по сравнению с рекомендациями нормативных документов. В данной работе изложены краткие обоснования необходимости учета пространственной неоднородности свойств ледяного покрова. Представлены результаты многолетних натурных исследований неоднородности ледяного покрова Амурского залива и бухты Новик залива Петра Великого Японского моря.

**Ключевые слова:** морской лед, прочность льда, неоднородность свойств льда, полевые исследования льда.

### Введение

Освоение разведанных запасов нефти и газа на шельфах дальневосточных и арктических морей имеет большое значение для повышения потенциала топливно-энергетического комплекса Дальневосточного региона и всей страны.

Анализ технических средств и способов и технологий разработки месторождений показывает, что на ближайшие десятилетия наиболее перспективным является надводный способ, требующий строительства уникальных морских ледостойких платформ (МЛП). Однако освоение месторождений шельфа северных и дальневосточных морей сдерживается тем, что еще недостаточно изучены нагрузки и воздействия дрейфующего ледяного покрова на МЛП и другие морские инженерные сооружения. При этом ледовые нагрузки как правило, являются преобладающими и определяют их основные параметры.

---

© Беккер А.Т., Фарафонов А.Э., Помников Е.Е., 2017

О статье: поступила: 27.07.2017; финансирование: бюджет ДВФУ.

Следует отметить слабую изученность закономерностей пространственно-временной изменчивости ледяного покрова. В частности, при определении проектных нагрузок и воздействий на МЛП важнейшее значение имеет назначение прочностных характеристик морского льда с учетом всех влияющих факторов. Неоднородность ледяного покрова – это особый фактор, учет которого при назначении проектных значений прочностных характеристик морского льда позволяет повышать точность определения нагрузок и воздействий. В настоящее время нормативные документы учитывают неоднородность ледяного покрова по его толщине путем дифференцированного определения прочностных характеристик по слоям.

Исследования показали, что учет пространственной неоднородности ледяного покрова в плане (в горизонтальной плоскости) позволяет значительно уточнить проектные значения ледовых нагрузок и воздействий в сторону их уменьшения по сравнению с рекомендациями нормативных документов.

Цель настоящей работы – обобщить результаты многолетних исследований и на этой основе разработать рекомендации для уточнения ледовых нагрузок.

### Неоднородность ледяного покрова

Нормы рекомендуют расчетное значение прочности льда принимать по результатам испытаний на одноосное сжатие не менее пяти образцов льда в точке с доверительной вероятностью 95%, определенной на основе их статистической обработки. Таким образом, в качестве расчетного значения прочности принимаются высокие значения прочности льда, вероятность появления которых мала, т.е. вводится определенный запас.

В процессе воздействия ледяных полей на сооружения ледовая нагрузка формируется при непосредственном разрушении льда перед сооружением. Акту разрушения предшествует определенное напряженно-деформированное состояние в конкретной зоне ледяного поля, примыкающей к сооружению. Учитывая, что ледовая нагрузка формируется не только за счет контактного разрушения льда, но и трещинообразования в ледяном поле, можно предположить, что на величину ледовой нагрузки может влиять характер распределения прочности ледяного поля не только по толщине, но и в горизонтальной плоскости (в плане).

Ледовая нагрузка от дрейфующего ледяного поля зависит от многих факторов, и в общем случае ее можно представить следующим выражением:

$$F = f(k, d, h, V, R), \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от выбранной модели взаимодействия и учитывающий различные факторы, характерные для данной модели (например, форма опоры сооружения, скорость дрейфа ледяного образования при взаимодействии и пр.);  $d$  – характерный размер опоры сооружения;  $h$  – толщина ледяного покрова;  $V$  – скорость движения ледяного образования;  $R$  – расчетная характеристика прочности льда.

Наибольшую неопределенность в выражении (1) имеет прочность льда. Основываясь на многочисленных исследованиях, общую зависимость прочности морского льда от различных факторов можно представить следующим образом:

$$R = f_1(\Theta, S, \rho, \text{структура, монолитность, генезис, снежный покров}), \quad (2)$$

где  $\Theta$  – температура льда, являющаяся функцией температуры воздуха, толщины снежного покрова, теплофизических свойств льда;  $S$  – соленость льда, зависящая от солености морской воды;  $\rho$  – плотность льда, являющаяся функцией структуры льда; **структура** льда зависит от условий образования льда (генезис).

Необходимо понимать, что ледяной покров является средой, которая формирует различные виды нагрузок и воздействий на инженерное сооружение. При этом ледяной покров состоит из различных видов ледяных образований: ровный лед (однолетний, многолетний),

торосы, стамухи, несяки и пр. Эти ледяные образования формируются в процессе взаимодействия ледяного покрова с природными факторами внешней средой: атмосферные явления (динамика температуры воздуха, движение воздушных масс, динамика атмосферного давления, осадки), гидрологический режим (течения, колебания уровня моря).

Перечисленные природные явления имеют ярко выраженный случайный характер и оказывают существенное воздействие не только на формирование макроструктуры ледяного покрова и его динамику в целом, но и на внутреннюю структуру ледяных образований, непосредственно воздействующих на инженерные сооружения. Поэтому очень важно при определении ледовых нагрузок учитывать влияние всех этих явлений.

Учитывая высокую степень пространственно-временной изменчивости ледяного покрова морских акваторий, а также длительные сроки эксплуатации морских инженерных сооружений, для расчета ледовых нагрузок необходимо иметь аппарат, основанный на теории вероятностей, теории случайных функций и описывающий динамику ледяного покрова в нескольких временных масштабах: многолетнем, сезонном, а также в процессе взаимодействия с сооружением. Вероятностный характер процесса механического формирования ледовых нагрузок при воздействии ледяных образований на сооружение определяется как неоднородностью самого ледяного образования, так и характером разрушения. Под неоднородностью здесь понимается разброс свойств льда по объему ледяного образования.

Рассмотрим неоднородность ледяных образований и ее учет при определении ледовых нагрузок на примере ровных ледяных полей. Как известно, неоднородность ледяных полей в одном направлении (по толщине) уже учитывается в нормативных документах путем разбивки ее на отдельные слои и осреднения прочности льда по толщине.

Более сложная задача – учет неоднородного распределения прочности льда в ледяном поле в горизонтальной плоскости – в плане. Впервые эта задача была поставлена в работе [2], в которой была сформулирована гипотеза о необходимости учета неоднородности ледяных полей в плане и предложен метод ее экспериментальной проверки.

Было предложено описывать степень неоднородности ледяных полей следующей функцией [2]:

$$F(S) = R_{aver}/R_{max}, \quad (3)$$

где  $R_{aver}$  – среднее значение прочности льда по заданному участку ледяного поля площадью  $S$ ;  $R_{max}$  – максимальное значение прочности на том же участке площадью  $S$ .

Был обоснован вид функции (3) на основе теоретического анализа (рис.1).

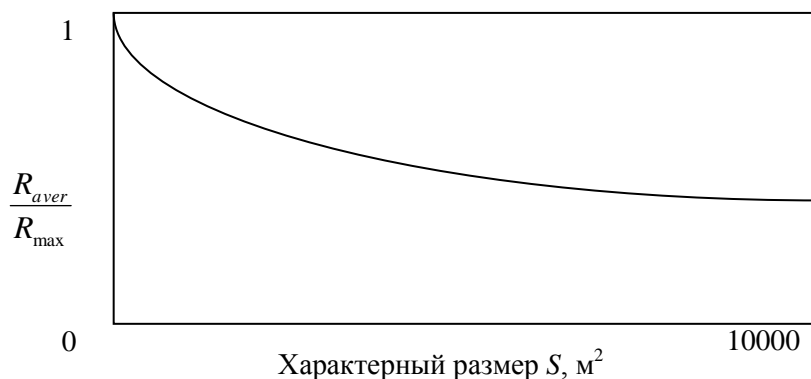


Рис. 1. Вид функции F(S).

Вид функции объясняется тем, что предельное максимальное значение отношения (3) не может быть больше единицы. Для больших площадей, порядка тысяч квадратных метров,

будет происходить чередование участков с высокой и малой прочностью, следовательно, отношение  $R_{aver}/R_{max}$  будет меньше единицы.

Для удобства эта функция была названа коэффициентом неоднородности  $k_n$ .

Натурные исследования неоднородности ледяных полей по предложенной методике полностью ее подтвердили.

### Натурные исследования пространственной неоднородности ледяных полей

В соответствии с разработанной методикой [1] были выполнены экспериментальные исследования в феврале 1996 г., 1999 ÷ 2001 гг. на ледяном покрове (припае) Амурского залива в черте г. Владивостока, а также в 2015–2017 гг. в бухте Новик залива Петра Великого (рис. 2).

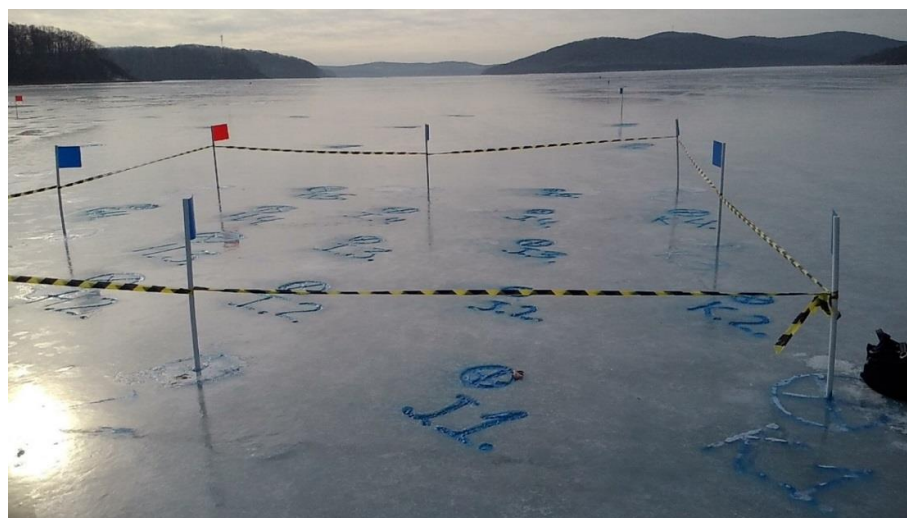


Рис. 2. Полигон для отбора образцов бухте Новик.

По результатам обработки натуральных данных построены карты распределения прочности льда (рис. 3), которые показывают, что зоны высокой прочности ледяного покрова случайным образом чередуется с зонами низкой прочности. Размеры этих зон также изменяются случайным образом.

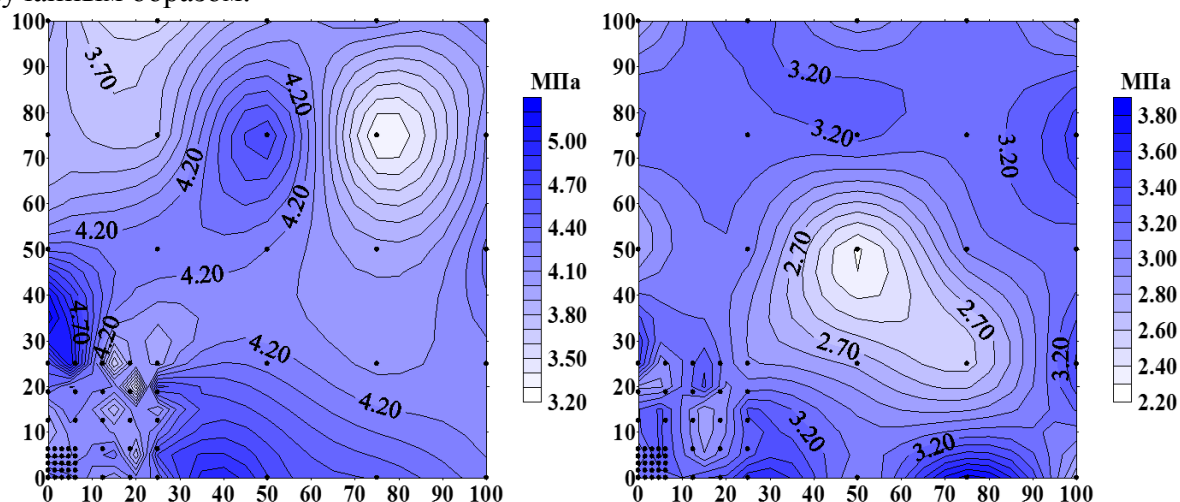


Рис. 3. Характерное распределение прочности по полигонам: слева – (1996-3), справа – (1999-2).

Для каждого полигона были получены функции распределения прочности и основные статистические характеристики (таблица, рис. 4). Как свидетельствуют результаты полевых испытаний, средняя прочность ледяного поля изменяется из года в год, а средняя прочность

для полигонов в пределах одного года изменяется незначительно, что объясняется условиями образования (генезисом) льда. Анализ распределений показывает, что прочность льда подчиняется нормальному закону распределения (см. таблицу).

Аппроксимирующие функции  $k_n = f(S)$

Полигон, годы, №	Температура льда, °С	$k_n=f(S)$
1996-1	-8,5	$y=0,896x^{-0,0208}$
1996-2	-8	$y=0,891x^{-0,022}$
1996-3	-4,5	$y=0,956x^{-0,0147}$
1999-1	-4,5	$y=0,923x^{-0,0119}$
1999-2	-4	$y=0,987x^{-0,0185}$
2000-1	-3	$y=0,800x^{-0,0304}$
2000-2	-4	$y=0,809x^{-0,0318}$
2001-1	-5	$y=0,641x^{-0,0326}$
2015 - Восток	-6,8	$y=1,0994x^{-0,042}$
2015 - Запад	-4,7	$y=1,0985x^{-0,039}$
2016 - Восток	-10,3	$y=1,1345x^{-0,045}$
2016 - Запад	-11	$y=1,2363x^{-0,063}$
2017 - Восток	-3,4	$y=1,4645x^{-0,097}$
2017 - Запад	-3,38	$y=1,4988x^{-0,097}$

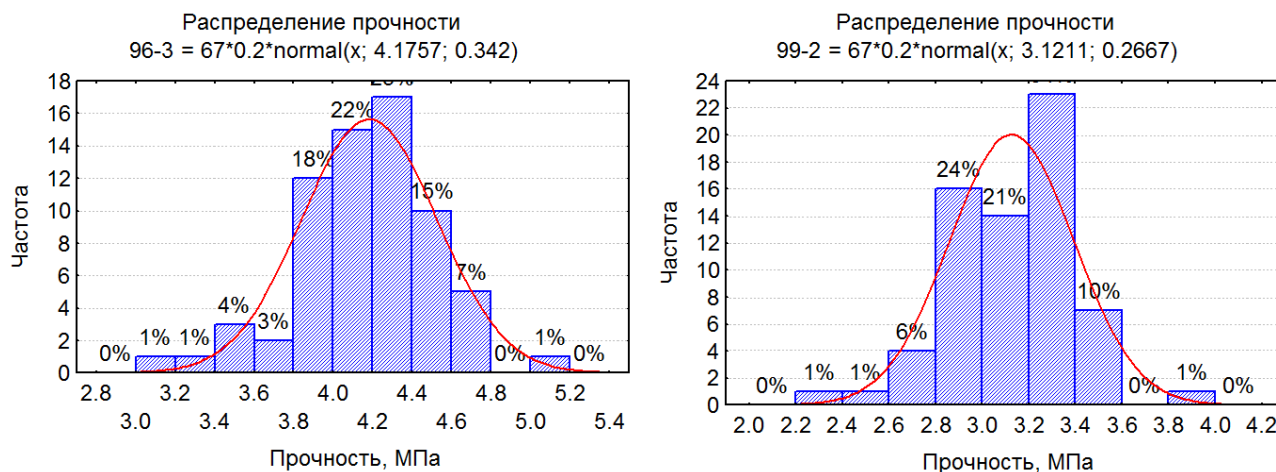


Рис. 4. Гистограммы распределения прочности по полигонам.

Для оценки влияния пространственной неоднородности, следовательно, дальнейшего ее учета при определении проектной прочности льда, коэффициент неоднородности определяется для каждой характерной площади как отношение средней прочности к максимальной прочности, результат наносится на график зависимости коэффициента пространственной неоднородности от площади полигона  $k_n = f(S)$ .

Исследование методами корреляционно-регрессионного анализа показало, что наиболее точно зависимость  $k_n = f(S)$  описывается степенной функцией вида  $y = ax^b$  (рисунки 5, 6;



таблица). Высокий коэффициент корреляции (0,61–0,97) показывает, что подобранная функция адекватно описывает зависимость между коэффициентом пространственной неоднородности и размерами площади ледяного поля. Обобщение и анализ результатов натурных исследований показали наличие пространственной (в плане) неоднородности ледяных полей.

Анализ полученных графиков показывает, что для площадей меньше 1000 м<sup>2</sup> значение коэффициента пространственной неоднородности приближается к единице и, следовательно, для сооружений с размерами до 16 м его необходимо принимать равным 1. Для площадей больших 1000 м<sup>2</sup> коэффициент пространственной неоднородности рекомендуется назначать по верхней огибающей, построенной нанесением на единый график кривых, полученных на разных полигонах и в разное время. Кроме того, необходимо отметить наличие на графике зоны, в которой изменение коэффициента неоднородности происходит столь незначительно, что этими изменениями можно пренебречь. В данном случае, для условий бухты Новик, такая зона наблюдается для ледяных полей площадью более 5000 м<sup>2</sup>.

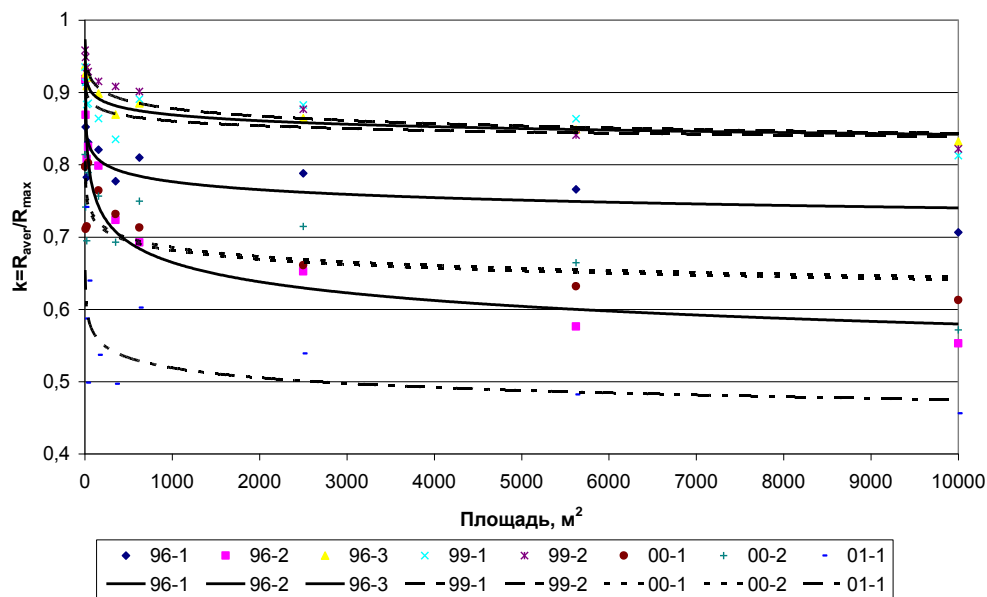


Рис. 5. График зависимости коэффициента неоднородности от площади ледяного поля (Амурский залив) [1].

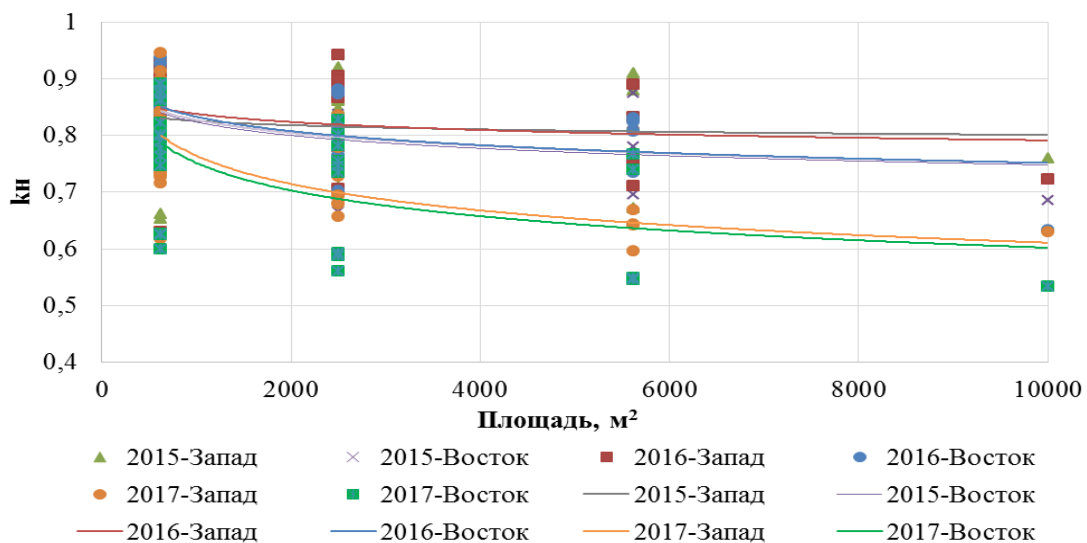


Рис. 6. График зависимости коэффициента неоднородности от площади ледяного поля (бухта Новик).

### Обсуждение результатов

Проведенная обработка результатов методами математической статистики показала, что распределение прочности ледяных полей в плане носит случайный характер. Следует отметить большой разброс значений прочности льда, что подтверждает высокую степень изменчивости свойств ледяных полей в плане. Используя методы математической статистики, были получены основные статистические характеристики распределения прочности для каждого полигона. Средняя величина прочности ледяных полей изменяется ежегодно, что вызвано различными внешними условиями.

Анализ показывает, что на больших площадях ледяных полей чередуются зоны с высокой и малой прочностью, следовательно, коэффициент пространственной неоднородности  $k_n$  будет меньше. График зависимости коэффициента пространственной неоднородности от площади полигона имеет постоянную форму. Подбор аппроксимирующей функции показал, что наиболее точно зависимость описывается степенной функцией вида  $y = a x^b$ .

Таким образом, экспериментально обоснована возможность уточнения расчетной прочности ледяного покрова посредством коэффициента неоднородности, определяемого по результатам натурных испытаний.

Анализ полученных графиков показывает, что в основном для площадей меньше  $1000 \text{ м}^2$  коэффициент неоднородности приближается к единице, следовательно, для сооружений с характерным размером в зоне контакта до 15 м, коэффициент неоднородности необходимо принимать равным единице.

Для площадей больше  $1000 \text{ м}^2$  коэффициент неоднородности рекомендуется назначать по верхней огибающей, построенной нанесением на один график кривых, полученных на разных полигонах и в разное время. Кроме того, необходимо отметить наличие в графике области, в которой изменение коэффициента неоднородности происходит столь незначительно, что этими изменениями можно пренебречь. В данном случае такая зона наблюдается, начиная с величины площади  $5000 \text{ м}^2$ . Средняя величина коэффициента неоднородности для площадей более  $5000 \text{ м}^2$  за время наблюдений равна 0,75, а максимальная величина коэффициента пространственной неоднородности для той же площади достигла 0,91.

### Заключение

В результате многолетних натурных исследований, выполненных в разных условиях, можно сделать вывод о том, что учет пространственной неоднородности ледяных полей позволяет обоснованно снижать проектные значения ледовых нагрузок на сооружения. Это имеет большое значение для повышения эффективности добычи нефти и газа на шельфах ледовитых морей, что позволит уменьшить стоимость ледостойких нефтепромысловых сооружений в ледовитых морях.

В некоторых случаях, в зависимости от линейных размеров сооружения, снижение расчетной нагрузки может достигать 10–15%. Дальнейшие исследования в этом направлении позволят получить статистику по многолетним наблюдениям, а также усовершенствовать методику отбора образцов льда.

В дальнейшем необходимо провести исследования по следующим направлениям:

- характерные геометрические масштабы неоднородности;
- влияние характера контактного разрушения ледяного поля, воздействующего на сооружение, на характерный размер зоны интенсивного напряженного состояния поля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фарафонов А.Э. Неоднородность ледяных полей и ее учет при определении ледовых нагрузок на морские гидротехнические сооружения: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Владивосток: ДВГТУ, 2006.
2. Bekker A.T. Program of Experimental Study of the Three-Dimensional Ice Strength Distribution for Ice Force Analysis. Proc. Offshore and Polar Engineering Conference. Los Angeles, 1996, p. 340-342.

THIS ARTICLE IN ENGLISH SEE NEXT PAGE

## CONSTRUCTION

**Hydrotechnical Construction**

DOI.org/10.5281/zenodo.897000

Bekker A., Farafonov A., Pomnikov E.

ALEXANDER BEKKER, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Director, School of Engineering, e-mail: [bekker.at@dvfu.ru](mailto:bekker.at@dvfu.ru)

ALEXANDER FARAFONOV, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department Marine Engineering, Theory of Buildings and Structures, School of Engineering, e-mail: [farafonov.aye@dvfu.ru](mailto:farafonov.aye@dvfu.ru)

EGOR POMNIKOV, Candidate of Engineering Sciences, Head of Ice Laboratory, School of Engineering, e-mail: [pomnikov.ee@dvfu.ru](mailto:pomnikov.ee@dvfu.ru)

*Far Eastern Federal University*

8 Sukhanova St., Vladivostok, Russia, 690091

**Heterogeneity of ice fields**

**Abstract:** The most promising way to exploit offshore natural resources is the overwater one which requires the construction of unique offshore ice-resistant platforms. At the same time, operating in the seas of the North and the Russian Far East is constrained by the fact that the ice pressure and the effect of drifting ice cover on engineering structures has not been properly researched. The ice force, as a rule, is prevalent and it determines the principal mass and size properties of the structures. Researches have shown that the heterogeneity of ice cover in the horizontal plane being taken into consideration, one can considerably specify the design values of the ice pressure and effect to reduce them as against the recommendations of normative instruments. The article contains a concise justification for taking into consideration the spatial heterogeneity of the properties of ice cover. It presents the results of long-term field researches in the heterogeneity of ice cover carried out in the Novik Bay and the Amur Bay of the Sea of Japan.

*Key words:* sea ice, ice strings, heterogeneity of sea ice, field ice test.

## REFERENCES

1. Farafonov A.E. Inhomogeneity of ice fields and its consideration in determining ice loads on marine hydraulic structures. Vladivostok, FESTU, 2006 (in Russ.).
2. Bekker A.T. Program of Experimental Study of the Three-Dimensional Ice Strength Distribution for Ice Force Analysis. Proc. Offshore and Polar Engineering Conference. Los Angeles, 1996, p. 340-342