

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-93-106  
УДК 629.563.2(211)

Г. Б. Крыжевич  
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АРКТИЧЕСКИХ НЕФТЕГАЗОДОБЫВАЮЩИХ ПЛАТФОРМ

**Объект и цель научной работы.** Объектом работы являются нефтегазодобывающие платформы. Целью работы состоит в обобщении опыта проектирования арктических плавучих нефтегазодобывающих платформ и выборе конструкции ледового пояса плавучих и стационарных сооружений, способствующей снижению интенсивности ледовых воздействий.

**Материалы и методы.** Для достижения цели используются методы теории проектирования объектов океанотехники, конструирования морских платформ и механики разрушения льда.

**Основные результаты.** Показано, что одним из перспективных вариантов компоновки ледостойкой плавучей платформы для арктического шельфа является ППБУ-тримаран с турелью, компоновка и форма которого включает целый ряд инновационных решений, обеспечивающих снижение затрат на разведочное бурение. Предложены новые решения для конструкций ледового пояса, обеспечивающие снижение ледовых нагрузок на шельфовые сооружения и уменьшение их материалоемкости.

**Заключение.** Результаты работы направлены на создание рентабельных, прочных и надежных нефтегазодобывающих платформ для Арктики.

**Ключевые слова:** океанотехника, ледостойкие нефтегазодобывающие платформы, плавучие полупогружные буровые установки, ледовый пояс платформы, проектирование шельфовых сооружений.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2019-1-387-93-106  
UDC 629.563.2(211)

G. Kryzhevich  
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

## DESIGN OF ARCTIC OIL & GAS RIGS

**Object and purpose of research.** This paper studies oil and gas rigs. The purpose is to generalize design experience of floating Arctic oil & gas platforms and selection of ice belt structure for floating and fixed platforms, in order to reduce ice loads.

**Materials and methods.** The study is done as per the methods of ocean structure design theory, offshore platform engineering and ice failure mechanics.

**Main results.** This paper shows that one of promising configurations for an ice-resistant Arctic floater is a semi-submersible trimaran with turret. Design and shape of this platform implements a whole number of innovative solutions that make wildcat drilling cheaper. The paper suggests new solutions for ice belt structures, that ensure mitigation of ice loads they have to suffer and reduce their material consumption.

**Conclusion.** This work is intended to facilitate development of cost-efficient, robust and reliable oil & gas rigs for the Arctic.

**Keywords:** ocean engineering, ice-resistant oil & gas platforms, semi-submersible drilling floaters, ice belt, design of offshore structures.

*Author declares lack of the possible conflicts of interests.*

*Для цитирования:* Крыжевич Г.Б. Проектирование арктических нефтегазодобывающих платформ. Труды Крыловского государственного научного центра. 2019; 1(387): 93–106.

*For citations:* Kryzhevich G. Design of Arctic oil & gas rigs. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019; 1(387): 93–106 (in Russian).

## Введение

### Introduction

Морские нефтегазодобывающие платформы в условиях Арктики подвергаются воздействию ледовых образований повышенной прочности и толщины, а также нагрузкам, обусловленным интенсивным ветром и волнением. Неблагоприятным фактором, влияющим на прочность и надежность конструкций платформ, является и низкая эксплу-



**Рис. 1.** Типы плавучих буровых установок для круглогодичной эксплуатации в Арктике: а) судно яйцеобразной формы; б) установка с корпусом в виде тела вращения (ЛПБУ Kulluk); в) полупогружная плавучая буровая установка JBF ARCTIC (опорное основание показано в разрезе); г) ЛПБУ клиновидной формы (концепция ЛПБУ ЦКБ «Коралл»); д) установка с корпусом в виде тела вращения (ЛПБУ Sevan)

**Fig. 1.** Types of drilling floaters for all-year-round Arctic operation: а) egg-shaped vessel; б) platform with body-of-revolution hull (Kulluk ice-resistant semisubmersible); в) JBF Arctic semisubmersible (substructure shown as profile); г) wedge-shaped ice-resistant floater (a concept of Central Design Bureau Korall); е) platform with body-of-revolution hull (Sevan ice-resistant rig)

ационная температура, способствующая образованию хрупких разрушений стальных конструкций и снижающая малоцикловую усталость узлов морской техники.

Отмеченные тяжелые природные и климатические условия необходимо учитывать при проектировании платформ и, прежде всего, при выборе архитектурно-компоновочных решений и проектировании ледового пояса. Обобщение опыта такого учета на основе анализа работ, выполненных в последние годы в Крыловском государственном научном центре, и создание рекомендаций по проектированию плавучих и стационарных объектов океанотехники для Арктики является целью настоящей статьи.

## Анализ архитектурно-компоновочных и конструктивных решений для плавучих ледостойких нефтегазодобывающих платформ

Analysis of architectural and design solutions for ice-resistant oil & gas floaters

Сложность освоения месторождений нефти и газа, открытых в арктических зонах, связана с необходимостью применения нетрадиционных технологий и принципиально новых технических средств, соответствующих тяжелым природным условиям. Выбор архитектурного облика и конструктивного оформления морского нефтегазового сооружения предопределяется, прежде всего, толщиной ледового покрова и глубиной моря. Весьма наукоемкой является проблема создания ледостойких плавучих буровых установок (ЛПБУ). Приступая к анализу их рационального облика, полезно рассмотреть имеющиеся типовые проектные решения [1]. Известно достаточно много архитектурно-компоновочных типов таких сооружений, обладающих определенными преимуществами и недостатками. Обычно поиск технических решений для ЛПБУ приводит к типовым формам платформ, представленным на рис. 1 [1–3].

ЛПБУ с судовыми обводами яйцеобразной формы (egg form) фирмы Mitsui (рис. 1а), снабженная турельным устройством, обладает повышенной ледостойкостью благодаря возможности разрушения изгибом дрейфующего льда, при котором наблюдается снижение ледовых нагрузок. Кроме того, наличие турели обеспечивает возможность

отсоединения системы удержания и райзера с последующим уходом установки с точки эксплуатации при экстремальном ухудшении ледовой обстановки. ЛПБУ с формой тел вращения в нижней их части (рис. 1б, д) также могут демонстрировать хорошую ледостойкость, особенно в тех случаях, когда они имеют форму конуса в районе ватерлинии.

Клиновидная форма корпуса платформы (рис. 1з), снабженной турельной системой удержания, позволяет снижать ледовые нагрузки и обеспечивать самоориентацию ледостойкой установки по отношению к направлению дрейфа ледового поля. ЛПБУ с таким обликом заслуживает особого внимания, поскольку она подвержена наименьшим глобальным воздействиям льда и обладает пониженной материалоемкостью по сравнению с другими рассмотренными выше вариантами платформ.

Общим недостатком таких типов платформ является относительно высокая материалоемкость конструкций, большая стоимость строительства, малая мобильность и интенсивная качка в условиях волнения. Вместе с тем плавучие буровые установки занимают доминирующее положение среди морских буровых установок, применяемых в практике морского разведочного бурения. К достоинствам этих установок относятся:

- сравнительно высокая мобильность, менее сложная постановка на рабочую точку и снятие с нее по сравнению с самоподъемными плавучими буровыми установками;
- возможность проводить глубоководное бурение на глубинах моря 150–1500 м и более; в настоящее время имеются несколько установок, способных осуществлять буровые работы на глубинах моря 2000–3000 м;
- малая интенсивность качки и высокая стабильность удержания на рабочей точке при воздействии морского волнения;
- большая приспособленность для работы в условиях газовых фонтанов и достаточная остойчивость при их наличии.

В арктических регионах полупогружные плавучие буровые установки (ППБУ) до сих пор эксплуатируются крайне редко. Это вызвано тем, что использование ППБУ в сложных ледовых условиях по сравнению с эксплуатацией этих сооружений при отсутствии ледяного покрова требует более значительных капитальных и эксплуатационных затрат. На резкий рост затрат влияет не только необходимость усиления конструкций ППБУ и системы ее удержания (позиционирования) с целью

придания установке повышенной ледостойкости. Также возникает потребность в использовании при эксплуатации в тяжелых ледовых условиях весьма дорогостоящих мощных ледокольных судов с ядерными энергетическими установками для обеспечения непрерывного ледового менеджмента, гарантирующего безопасность эксплуатации. Именно поэтому обычно стараются избегать круглогодичной эксплуатации ППБУ на точке бурения в чрезмерно сложных ледовых условиях. Ледовые подкрепления большинства созданных установок позволяют буксировать и осуществлять их эксплуатацию лишь в относительно легких ледовых условиях. Для защиты райзеров ото льда на подобных объектах всегда предусматривается дополнительная центральная колонна (защитный кожух), сквозь которую ведется бурение скважины. Такие ППБУ выполняют основные функции только в течение благоприятного «окна» (при отсутствии ледяного покрова с большой толщиной). Оценка продолжительности этого «окна» должна проводиться взвешенно, исходя из климатических условий акватории и данных метеопрогнозов.

Поиск рациональных проектных решений обычно приводит к некоторому компромиссу между уровнем ледостойкости установки, ее материалоемкостью, ходкостью (включая ходкость во льдах) и интенсивностью качки на морском волнении. Такой поиск, как правило, заканчивается принятием одного из двух типовых решений, существенно различающихся уровнем ледостойкости. В одном случае идут на создание ППБУ с ограниченной ледостойкостью, требующей ее снятия с рабочей точки при угрозе возникновения недопустимо тяжелой ледовой обстановки. При втором – создают ППБУ, допускающую круглогодичную эксплуатацию (в том числе в суровых ледовых условиях). Такая установка представляет собой большое и дорогостоящее сооружение, как, например, ППБУ JBF ARCTIC с проектным водоизмещением порожнем около 70 тыс. т.

Размеры установок с ограниченной ледостойкостью значительно меньше. Например, водоизмещение платформы «Полярная звезда» примерно в два раза меньше, чем у JBF ARCTIC. Отсюда и следуют относительно низкие затраты на строительство таких платформ. По своему архитектурно-компоновочному облику они могут мало отличаться от традиционных ППБУ. Основные отличия состоят в следующем:

- стремление исключать применение подкрепляющих ППБУ раскосов, пересекающих ватерли-

нию и увеличивающих ледовые воздействия на платформу;

- создание ледового (усиленного) пояса на конструкциях, взаимодействующих со льдом, а иногда и установка конических ледоразрушающих наделок;
- создание защитных конструкций для райзера [3] или специальной центральной колонны, внутри которой располагается райзер.

Практика создания ледостойких ППБУ показывает, что в большинстве случаев проектировщики предпочитают созданию объектов с ограниченным уровнем ледостойкости, но в этой практике есть и исключения. К настоящему времени компанией Huisman хорошо проработан проект полупогружной установки [1], предназначенной для круглогодичной эксплуатации в экстремальных ледовых условиях (при толщине льда порядка 2-3 м) – ППБУ JBF ARCTIC (рис. 1б). В соответствии с концепцией этой компании установка состоит из кольцеобразного понтона диаметром 116 м, на котором закреплены восемь наклонных стабилизационных колонн с решетками между ними. Решетки препятствуют прониканию крупных фрагментов разрушаемого льда в пространство между колоннами и созданию опасных условий для функционирования райзера. На колоннах располагается верхнее строение со сдвоенной буровой вышкой.

Органическими недостатками традиционно архитектурно-компоновочного облика ППБУ является:

- необходимость создания специальных материалоёмких конструкций защиты райзера от ледовых воздействий;
- возможность заклинивания обломков льда между стабилизирующими колоннами (СК) (а также между колоннами и защитой райзера), вызывающего увеличение глобального воздействия ледяных образований на ППБУ.

ППБУ JBF ARCTIC лишена этих недостатков, однако имеет повышенную склонность к формированию на ней ледовых воротников. Такая склонность обусловлена наличием массивных металлических конструкций, которые создают обширные каналы теплопередачи от погруженного в воду опорного основания к верхнему строению и способствуют образованию льда на участках колонн, расположенных ниже ватерлинии. Развитие этого процесса может приводить к формированию внутри опорного основания сплошной массивной ледяной пробки. Кроме того, появлению массивной пробки

может способствовать заброс в условиях ветра и волнения ледяной шуги в застойную зону (в подкупольное пространство установки, образуемое наклонными колоннами и верхним строением).

Учитывая ориентацию этой ППБУ на экстремальные ледовые условия эксплуатации, выскажем следующее соображение. Если ледовые силы назначены обоснованно, а параметры ледового пояса и якорных линий выбраны правильно, то установка может удовлетворять требованиям эксплуатационной безопасности и обеспечивать высокую прибыль от эксплуатации при тяжелых ледовых условиях. В этом случае до завершения строительства скважины установка может не покидать район буровых работ ввиду ледовых условий, поскольку она рассчитана на экстремальные воздействия льда. Но эта концепция нерациональна при относительно малой продолжительности экстремальных ледовых условий в районе бурения.

Максимальная глубина акватории в местах эксплуатации ППБУ JBF ARCTIC не должна превышать 1500 м, глубина бурения – 12 000 м. Удержание на точке осуществляется благодаря 20 якорным линиям в виде цепей калибра 162 мм.

В проекте для каждого режима эксплуатации выбраны 4 различные осадки, обеспечивающие:

- хорошее демпфирование качки на волнении за счет рассеяния энергии при пересечении наклонными (СК) поверхности жидкости, сопровождающемся интенсивным волнообразованием;
- снижение ледовых нагрузок благодаря разрушению льда изгибом при его взаимодействии с наклонными СК;
- повышение ходкости ППБУ благодаря малой осадке в транспортном положении.

## Тримаран с турелью как ППБУ для Арктики

Trimaran with turret as a promising semi-submersible for the Arctic

Ликвидация недостатков традиционного облика полупогружной установки достигается за счет перехода от катамаранной схемы сооружения к тримаранной (рис. 2) [4]. Установка состоит из трех понтонов (одного центрального и двух боковых), соединяемых с верхним строением с помощью трех СК. Эти колонны могут быть соединены между собой в нижней части с помощью распорок.

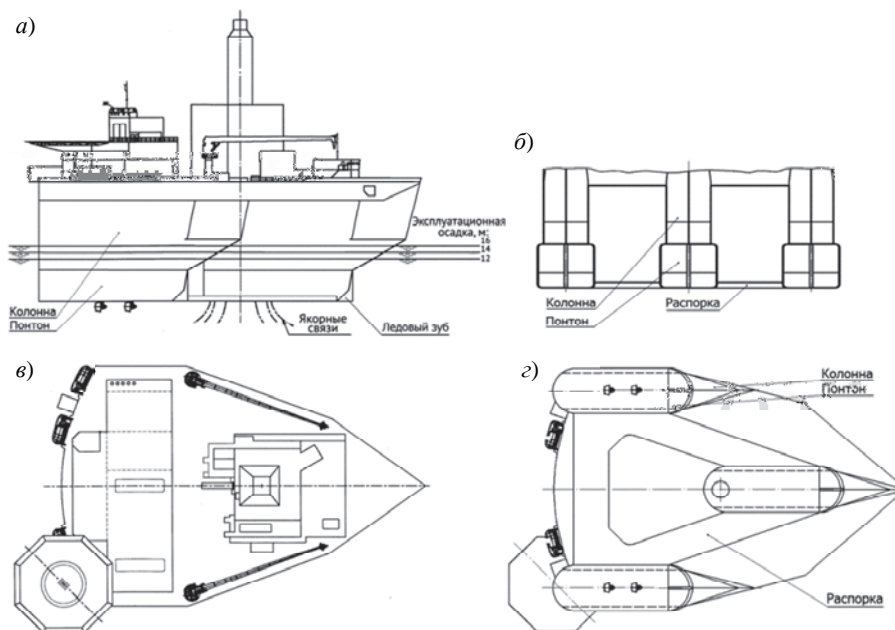
Стабилизирующие колонны и понтоны содержат балластные цистерны. Понтоны имеют закруг-

**Рис. 2.** Перспективная ледостойкая ППБУ:

- а) вид сбоку;
- б) вид спереди на стабилизирующие колонны и понтоны;
- в) вид сверху;
- г) вид снизу

**Fig. 2.** Advanced ice-resistant semi-submersible:

- a) side view;
- b) front view of stabilizing columns and pontoons;
- c) top view;
- d) bottom view



ления в оконечностях, улучшающие ходовые качества ППБУ. Для придания ледорезных качеств носовые оконечности СК имеют клинообразную форму поперечных сечений, а в носовых частях понтонов содержатся ледовые зубья. Форштевни СК в районе ватерлинии выполняются с наклоном, обеспечивающим разрушение льда изгибом. Сами ватерлинии СК в носовых частях заострены. Боковые понтоны и колонны сильно сдвинуты в корму ППБУ по отношению к центральному понтону. При этом носовые части боковых колонн располагаются после кормовой части центральной колонны. Такое взаимное расположение колонн обеспечивает прохождение обломков льда под установкой (под верхним строением) без заклинивания.

Установка включает в себя вертикальную шахту, проходящую через верхнее строение, центральную СК и центральный понтон. В шахте располагается райзер. В нижней части шахты находится ниша для турели, к которой присоединяется якорная система удержания. Заострение носовых оконечностей колонн совместно с их взаимным расположением обеспечивает ориентацию носовой части ППБУ навстречу движению ледового поля.

На верхней палубе верхнего строения расположены буровая установка, блок технологического оборудования, жилой модуль, вертолетная площадка, спасательные шлюпки.

Расчетные оценки показывают, что при габаритной длине установки 114 м и ширине 68 м ее водоизмещение составляет 21 100 т. При расчетной

толщине ровного льда 3 м ледовая нагрузка составит около 7,5 МН, нагрузка от тороса – около 16 МН. Следует подчеркнуть, что эти значения ледовых нагрузок оказывают прямое влияние на количество и массу связей якорной системы. Так как нетрадиционная форма ледорезных СК способствует значительному снижению воздействий ледовых нагрузок на сооружение, масса якорной системы позиционирования и усилия в якорных линиях будут меньше в сравнении с аналогичной системой позиционирования ППБУ с традиционной архитектурно-компоновочной схемой.

ППБУ-тримаран с турелью является одним из перспективных вариантов компоновки ледостойкой платформы при освоении глубоководных месторождений арктического шельфа и включает целый ряд инновационных решений, обеспечивающих снижение затрат на разведочное бурение. При этом практический интерес представляет и вариант без турельного устройства и якорных линий, которые заменяются системой динамического позиционирования.

Многолетний опыт эксплуатации ППБУ показал, что принцип полупогружных корпусов, обеспечивших ППБУ ведущие позиции в сегменте буровых установок, сохранит важную роль и при создании новых ледостойких платформ. При этом особую значимость приобретает дальнейший поиск оптимальных технических решений по созданию разнообразных конструктивных типов ППБУ, способных обеспечить высокую рентабельность уста-

новок в конкретных природных условиях эксплуатации, характеризуемых параметрами ледовых полей, волнения и ветра. Традиционные и вновь предлагаемые архитектурно-компоновочные решения нацелены на уменьшение площади действующей ватерлинии, способствующей снижению волновых и ледовых воздействий на установки, сохранение важного свойства «волнопрозрачности» погруженной части ППБУ и, как следствие, на уменьшение ее горизонтальных и вертикальных перемещений при качке. Созданные на этой основе ППБУ смогут быть вполне ледостойкими, удобными в эксплуатации и занимать одно из лидирующих положений на мировом рынке океанотехники.

Рационализация конструкций ледового пояса колонн с целью уменьшения ледовых нагрузок и материалоемкости является одним из основных направлений совершенствования ледостойких установок. В этом плане наработки, сделанные при создании первых отечественных ледостойких ППБУ, позволяют предложить ряд новых конструктивных решений [5, 6], направленных на повышение ледостойкости таких платформ и снижение толщин элементов ледового пояса. К настоящему времени накоплен некоторый опыт проектирования и эксплуатации ледостойких ППБУ, позволяющий считать их надежными и отвечающими современным требованиям морского бурения в арктических условиях. На основе этого опыта наметились рациональные архитектурно-конструктивные формы ледостойких ППБУ, для которых характерны:

- использование двух или трех упрощенных подводных понтонов с СК (по одной или по две на каждый понтон). Подводные понтоны могут соединяться между собой расположенными в горизонтальной плоскости распорками. Какие-либо раскосы, пересекающие ватерлинию, отсутствуют, что позитивно отражается на уровне волновых и ледовых воздействий на платформы;
- упрощенная конфигурация СК (от цилиндрических до прямоугольных);
- применение наклонных колонн (либо ледоразрушающих наделок [2, 3]), увеличивающих демпфирование качки и снижающих ледовые нагрузки;
- применение ледорезной формы СК и ледовых зубьев в их подводной части.

При использовании прямоугольных (квадратных) колонн со скошенными углами одна из граней колонн, как правило, устанавливается заподлицо с бортовой обшивкой, что облегчает обеспечение прочности сооружения в целом.

Заметим, что наклонная конфигурация СК весьма эффективна, поскольку не только уменьшает качку ППБУ на волнении, но и вызывает разрушение изгибом ледяного покрова, наползающего на боковую поверхность колонны. При этом уровень ледовых нагрузок по сравнению с вертикальной цилиндрической колонной существенно снижается. Поэтому в обозримом будущем наклонные СК могут стать одной из важнейших особенностей облика ледостойких ППБУ. Другой особенностью облика должно стать уменьшенное число колонн, приходящихся на один понтон (не более двух). Малое число колонн не только способствует снижению глобальных ледовых воздействий на ППБУ, но и позволяет уменьшить материалоемкость установок (не снижая показателей жесткости и прочности), поскольку при установленном ограничении на массу конструкций увеличение размеров сечений колонн более благоприятно сказывается на увеличении суммарных значений моментов инерции и моментов сопротивлений сечений, чем увеличение числа колонн.

## **Особенности взаимодействия льда с ледовым поясом нефтегазодобывающих платформ**

Specifics of ice interaction with ice belts of oil & gas rigs

При создании прочных, надежных и легких конструкций ледового пояса морских платформ и сооружений (стационарных и плавучих буровых установок, отгрузочных терминалов, маяков и других объектов океанотехники) целесообразно не только правильно выбирать их материалы и размеры, но и принимать конструктивные меры по снижению ледовых нагрузок.

Обеспечивая прочность и надежность конструкций и сооружений, инженеры обычно решают задачу уменьшения концентрации напряжений. При создании конструкций ледового пояса морских сооружений у специалистов возникает потребность решения и обратной задачи – увеличения концентрации в контактных зонах ледяных образований. В самом деле, ледовый пояс будет эффективно функционировать в том случае, если при его взаимодействии с ледовым полем не будут возникать чрезмерно большие контактные усилия. Для их снижения следует принять конструктивные меры с целью повышения концентрации напряжений в ледовом поле, облегчающей его разрушение

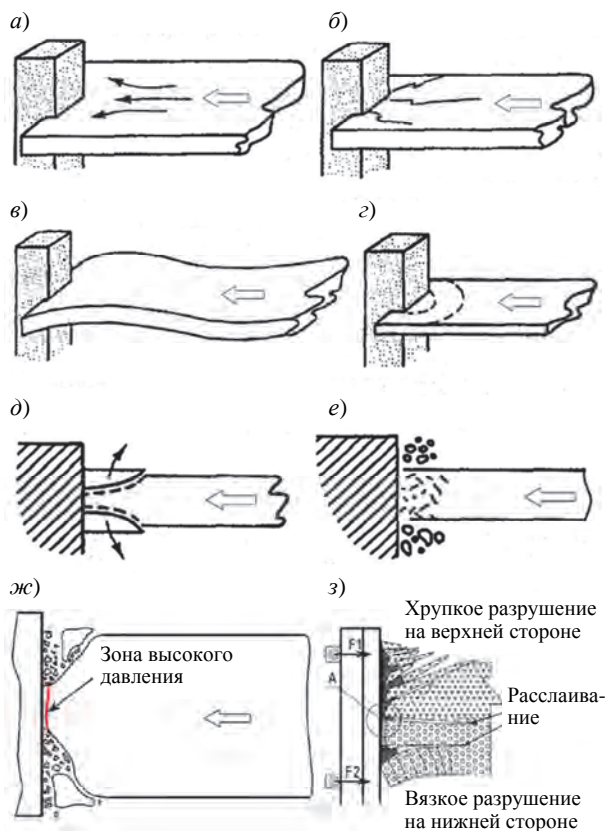
при малой интенсивности взаимодействия льда с сооружением.

При выработке конструктивных мер необходимо учитывать особенности разрушения льда. В [7–18] рассматривались типы разрушений, приведенные на рис. 3.

1. *Ползучесть* наблюдается при очень низкой скорости внедрения льда (согласно [15], при скорости ниже 1–3 мм/с), а также при его температуре, сравнительно близкой к температуре таяния, когда лед пластичен. Деформация развивается непрерывно, без интенсивного образования трещин. Контакт сооружения со льдом – идеальный, лед контактирует со всей фронтальной поверхностью сооружения в районе ватерлинии. Поэтому иногда нагрузки при этом типе разрушения близки к максимальным. Ледовая нагрузка постепенно увеличивается, достигает максимума, а затем начинает снижаться до устойчивого постоянного уровня, который составляет 50–60 % максимального значения. По мнению некоторых исследователей [14], ползучесть развивается только около узких сооружений. Если сооружение широкое, а лед тонкий, то он изгибается [13, 18–19]. Этот продольный изгиб и разрушение возникают при гораздо более низком давлении, чем требуется для развития пластических деформаций. Однако при взаимодействии льда большой толщины с очень широким сооружением (например, с платформой Molikraq) развитие ползучести вполне возможно [16].

2. Образование *радиальных трещин* во льду обычно происходит при развитии растягивающих напряжений, превышающих определенный уровень. Необходимое условие их появления – значительное отношение ширины сооружения (или его колонны)  $D$  к толщине льда  $h$ . Если сооружение имеет прямоугольную форму, трещины образуются у его углов и расходятся лучами в разные стороны. Также трещины могут появиться перед сооружением, имеющим цилиндрическое поперечное сечение. В этом случае образуются центральные и боковые трещины. Иногда вслед за этим начальным этапом разрушения возникает продольный изгиб образовавшихся ледяных секторов.

3. *Потеря устойчивости поля* особенно характерна для ситуаций, где присутствуют тонкий лед и широкие сооружения [16, 18, 19]. Этот тип разрушения часто связан с образованием радиальных и кольцевых трещин и появлением признаков выпучивания.



**Рис. 3.** Типы разрушений ледового поля перед сооружением: а) ползучесть; б) радиальные трещины; в) выпучивание; г) кольцевые трещины; д) расслаивание; е) дробление; ж) чередование сколов (на верхней и нижней сторонах ледяной пластины) и выдавливания мелкодисперсных продуктов разрушения в средней части; з) комбинация расслаивания (в средней части пластины) с хрупким (на верхней стороне) и вязким (на нижней стороне) разрушением

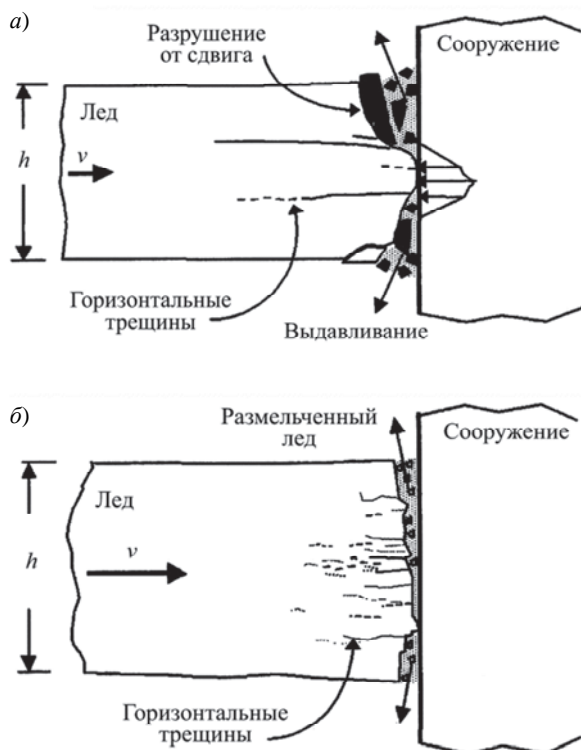
**Fig. 3.** Ice failure patterns in front of the structure: а) creep; б) radial cracking; в) buckling; г) circular cracks; е) delamination; ф) crushing; г) alternating chips (on upper and lower sides of ice plate) and pressing-out of small fragments in the middle part; h) delamination (middle part of the plate) in combination with brittle (upper part) and viscous (lower part) failure

4. *Кольцевые трещины* могут появиться в результате упругого изгиба ледового поля, вызванного эксцентриситетом приложения к нему нагрузки (в частности, при взаимодействии с наклонными гранями сооружений или конусными наделками их колонн).

5. *Расслаивание* – образование в ледовом поле в зоне контакта с сооружением горизон-

талльных трещин, которые разделяют ледовое поле на слои (рис. 3д). Протяженность трещин уменьшается при росте скорости ледового поля (рис. 4). Конечная стадия этого явления характеризуется образованием фрагментов льда на верхней и нижней частях ледового поля. Впоследствии эти фрагменты вылетают вверх и вниз.

6. *Дробление.* При высокой скорости происходит непрерывное дробление льда в случае как узких, так и широких сооружений. Это приводит к неполному, неодновременному контакту и неравномерному распределению давления по номинальной контактной поверхности. Раздробленный материал вылетает со скоростью, пропорциональной скорости движения поля. Такое разрушение часто приводит к появлению максимальных нагрузок.
7. *Изгиб* в большинстве случаев возникает при взаимодействии льда с сооружениями с наклон-



**Рис. 4.** Разрушение льда с расслаиванием [7] при различных скоростях дрейфа льда: а)  $v = 30$  мм/с; б)  $v = 80$  мм/с

**Fig. 4.** Ice delamination [7] at different drift speeds: а)  $v = 30$  mm/s; б)  $v = 80$  mm/s

ными гранями или с конусными наделками колонн. Обычно при изгибе ледового поля, когда оно поднимается по наклонной грани, происходит образование радиальных и кольцевых трещин. Преобладание того или другого типа трещин зависит от ширины сооружения и толщины льда.

8. *Чередование ползучести и дробления* [11, 15] возникает при промежуточных (достаточно низких) скоростях и податливых сооружениях. При действии на сооружение движущегося ледового поля происходит одновременно пластическое сжатие льда и деформация сооружения. После достижения контактными напряжениями определенного предела лед разрушается, накопившаяся в сооружении энергия освобождается, и оно движется в обратном направлении с высокой, по сравнению со скоростью предыдущего деформирования, относительной скоростью. В результате происходит резкий удар и последующее дробление льда. Следствием этого процесса является образование пилообразной нагрузки, часто сопровождающейся либо кратковременной, либо устойчивой вибрацией [17].
9. *Чередование сколов* (на верхней и нижней сторонах ледяной пластины) и последующего образования мелкодисперсных продуктов разрушения в средней части контактной зоны, которые затем выдавливаются вверх и вниз (рис. 3ж). В дальнейшем происходит увеличение этой зоны и рост средних контактных давлений в ней, приводящий к сколам. Такое циклическое повторение отмеченных стадий процесса разрушения характерно для средних толщин льда [8].
10. Комбинация расслаивания (в средней части ледяной пластины) с хрупкими сколами (на верхней стороне) и вязким разрушением (на нижней стороне) характерна для взаимодействия с толстым льдом жесткого цилиндра малого диаметра (рис. 3з) (например, индентора для тестирования механических свойств льда) [20].

При поиске конструктивных мер по снижению ледовых нагрузок целесообразно принимать во внимание такие решения, которые способствуют появлению в ледовых образованиях на самых ранних стадиях разрушения льда и при малых уровнях нагрузок на сооружение изгиба, ползучести, радиальных и кольцевых трещин, сколов, расслаивания и других изменений его структуры.



## Снижение ледовых воздействий на конструкции за счет совершенствования конструкций ледового пояса нефтегазодобывающих платформ

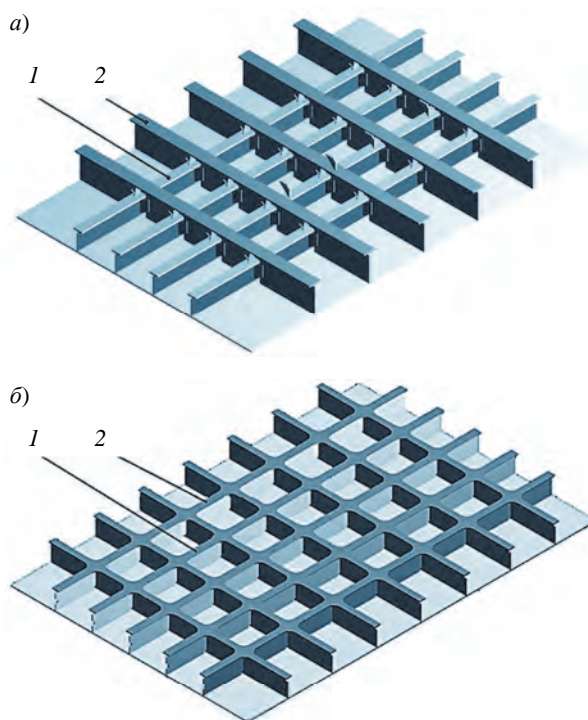
Reduction of ice loads by means of more advanced structural design of ice belts for oil & gas rigs

Обычно ледовый пояс стального сооружения представляет собой систему усиленных перекрытий, опирающихся на платформы, переборки или усиленные набором диафрагмы. Традиционно основными несущими элементами перекрытий являются обшивка, имеющая с внешней стороны, подверженной воздействию льда, гладкую (пологую) поверхность, перекрестные связи (рамные балки) и ребра жесткости (балки главного направления), высота которых, как правило, значительно ниже высоты рамных балок (рис. 5а). Однако при форме опорного контура, близкого к квадрату, рациональным может оказаться оформление перекрытия с одинаковыми высотами балок горизонтального и вертикального направлений (рис. 5б). Такое решение принято, например, для перекрытий колонн ПШБУ «Полярная звезда», спроектированных в Крыловском центре, при этом вертикально направленные балки опираются на горизонтально расположенные внутри колонн платформы, а горизонтально направленные – на поперечные переборки внутри платформ и на борта колонн. В некоторых ситуациях (при повышенных требованиях к герметичности ледового пояса) может применяться конструкция типа «двойного дна».

В настоящей работе выполнен поиск новых конструктивных решений для ледового пояса стальных морских сооружений, позволяющих:

- снизить величины ледовых нагрузок на конструкции;
- уменьшить материалоемкость конструкций ледового пояса сооружения в целом;
- осуществлять (в случае модернизации объекта, связанной с изменением условий эксплуатации или с другими причинами) эффективное усиление конструкций ледового пояса.

Достичь этих положительных эффектов можно за счет применения нескольких вариантов исполнения перекрытий. В первых четырех вариантах предлагаемые конструкции ледового пояса с обшивкой цилиндрической формы содержат ледоразрушающие наделки 11 пирамидальной формы, соединенные

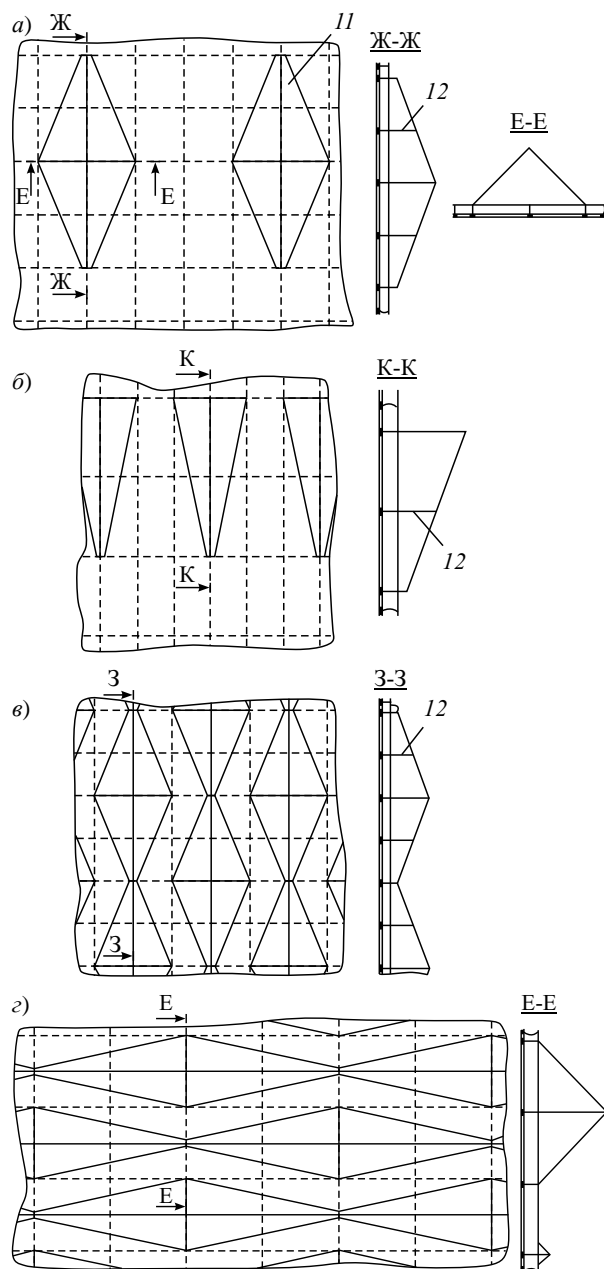


**Рис. 5.** Примеры традиционного оформления перекрытий ледового пояса с балками разной высоты (а) и одинаковой высоты (б)

**Fig. 5.** Examples of conventional designs for ice belt grillage with beams of different (a) and same (b) height

сваркой с обшивкой (рис. 6). Рекомендуемыми формами основания ледоразрушающей пирамиды являются четырехугольник или треугольник. Допускается основание в виде окружности. Внутри каждой наделки установлены диафрагмы 12, совмещенные со стенками балок перекрытия, и поддерживающие обшивку наделок. Причем в первых двух вариантах имеется единственный ряд наделок (рис. 6а, б), а в остальных наделки расположены в несколько рядов. В последних случаях возможно шахматное расположение наделок, вытянутых либо в вертикальном направлении, при котором длинные боковые ребра пирамиды лежат в вертикальной плоскости (рис. 6в), либо в горизонтальном направлении (рис. 6г).

При контакте пирамидальных наделок со льдом в районах их ребер (пересечения граней пирамид) наблюдается концентрация напряжений, приводящая к быстрому развитию в этих районах пластического течения льда (при очень малых нагрузках на сооружение), к охрупчиванию льда и появлению трещин. Причем при использовании первых трех



**Рис. 6.** Варианты конструкции ледового пояса: с ледоразрушающими наделками, выставленными в один ряд (*а* – с четырехугольным основанием пирамиды, *б* – с треугольным основанием пирамиды) и в шахматном порядке (*в* – с наделками, вытянутыми в вертикальном направлении, *г* – с наделками, вытянутыми в горизонтальном направлении)

**Fig. 6.** Variants of ice belt structure: with ice-breaking features arranged in one row (*a* – square pyramid, *b* – triangular pyramid) and chequer-wise, with ice-breaking features arranged vertically (*c*) and horizontally (*d*)

вариантов формируются преимущественно радиальные и кольцевые трещины, а в четвертом варианте – расслаивающие трещины.

Первые три варианта целесообразно применять при условиях эксплуатации сооружения, характеризуемых воздействием на него льда малой (по сравнению с шириной пояса) и средней толщины. Известно, что при большой относительной ширине ледового пояса (по отношению к толщине ледяного поля) взаимодействие этого поля в наиболее неблагоприятной ситуации (при дрейфе льда в направлении, перпендикулярном плоскости ледового пояса) сопровождается интенсивными периодическими (пилообразными) ледовыми воздействиями. При достижении пикового значения нагрузки от ледяного поля отделяются большие фрагменты, ширина которых сопоставима с шириной ледового пояса [18, 19]. При использовании первых трех вариантов радиальные трещины образуются по всей ширине ледового пояса, а не только у углов сооружения (при прямоугольной форме горизонтального сечения ледового пояса) или в центральной части (при форме пояса в виде кругового цилиндра). Вслед за этим начальным этапом разрушения будет возникать изгиб с изломом и отделение от поля льда образовавшихся ледяных секторов, сопровождающееся малыми локальными ледовыми нагрузками. Снижение ширины отделяемых фрагментов способно вызывать уменьшение как общего ледового воздействия на сооружение, так и локальных воздействий за счет сокращения площади контакта фрагментов льда и конструкции ледового пояса. Поскольку такое отделение происходит у разных секторов в разное время, то это обстоятельство приводит к большому снижению глобальных нагрузок на сооружение.

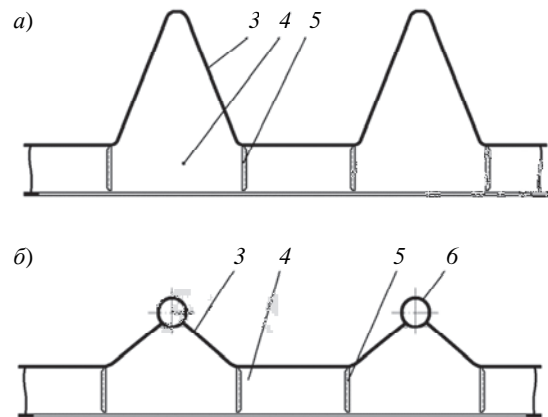
Третий вариант (рис. 6в) удобен для использования при большой изменчивости положения действующей ватерлинии в процессе эксплуатации. Четвертый вариант (рис. 6г) целесообразно применять при воздействии на сооружение толстого льда. Вытянутые в горизонтальном направлении наделки провоцируют не только появление расслаивающих трещин, но и скалывание льда в верхней и нижней частях ледового образования (по схеме, изображенной на рис. 3ж) либо пластическое разрушение нижней части по схеме рис. 3з. Во всех рассмотренных вариантах исключаются ситуации, приводящие к большим локальным и глобальным нагрузкам на сооружение:

- вязкое разрушение (ползучесть) по всей толщине льда (по схеме рис. 3а);
- дробление льда с образованием мелких продуктов разрушения (рис. 3е);

- мелкодисперсное измельчение льда в средней части ледяной пластины (рис. 3ж).

Рассматриваемые ниже другие варианты конструкции ледового пояса (рис. 7, 8) применимы при любой толщине льда. Предлагаемое перекрытие в пятом варианте исполнения (рис. 7) содержит гофрированную обшивку 3 и балки горизонтального направления 4, стенки которых усилены ребрами 5 [5, 6]. Ширина полки гофрированного профиля с внутренней стороны платформы существенно (более чем в 2 раза) превышает ширину полки, расположенной с наружной стороны колонны. Полки балок вертикального направления могут быть усилены трубой 6 или прутком (рис. 7б).

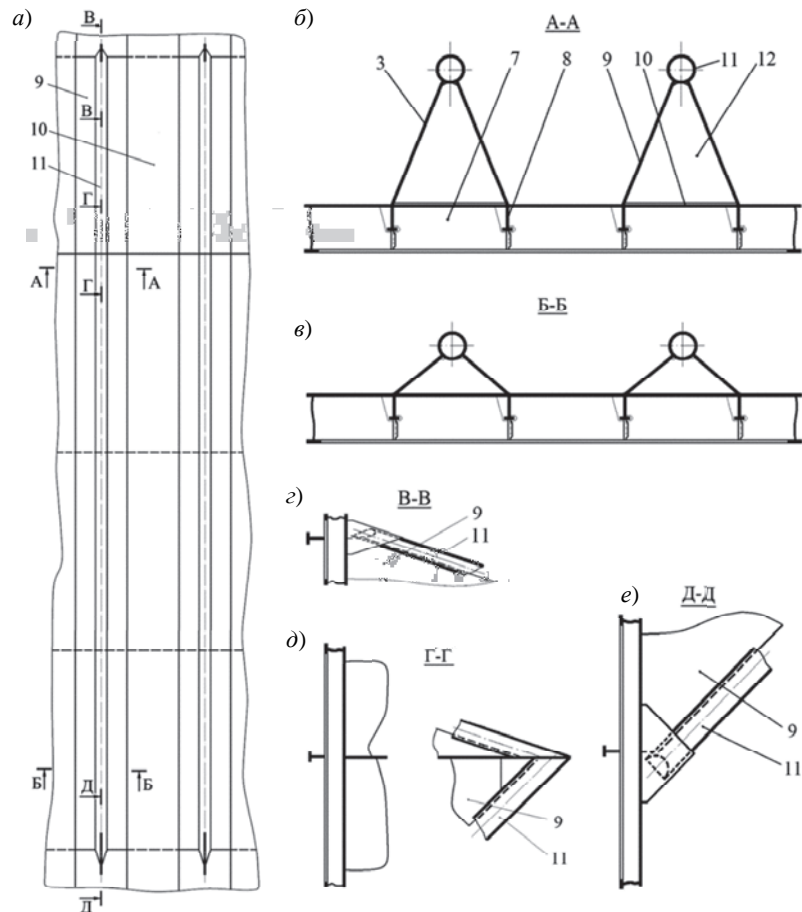
В шестом варианте исполнения [5, 6] предлагаемое перекрытие (рис. 8) содержит горизонтально ориентированные стержни (балки) 7 и пересекающие их балки другого (перпендикулярного) направления. Последние выполнены составными и включают сквозные балки 8, продолжающиеся за пределы ледового пояса, и две наклонные стенки 3, притыкающиеся к обшивке колонны 10 по линии со-



**Рис. 7.** Горизонтальное сечение перекрытий с двумя вариантами конструктивного оформления вертикально расположенных балок:

- а) в виде вертикальных гофров;
- б) в виде гофров (балок), усиленных трубой

**Fig. 7.** Horizontal section of grillage with two variants of vertical beams: a) corrugated beams; b) corrugated beams reinforced with a pipe



**Рис. 8.** Ледовое усиление колонны ППБУ с перекрытием, содержащим составные балки: а) фрагмент ледового пояса (вид сбоку); б–е) сечения перекрытия

**Fig. 8.** Ice reinforcement of semisubmersible's column, with grillage made up by beams: a) a fragment of ice belt (side view); b–f) grillage sections

единения ее со стенками сквозных балок. Составные балки усиливаются трубчатым или прутковым профилем 11, а устойчивость их наклонных стенок повышается за счет установки диафрагм 12. Наклонные стенки могут иметь форму, обеспечивающую наклон профилей к вертикали под углом не менее  $18^\circ$ , способствующих снижению ледовых воздействий. Соседние балки перпендикулярного направления могут иметь как одинаковую, так и разную высоту, а их стенки 3 могут устанавливаться на каждом из ребер жесткости 8 или с пропуском нескольких ребер.

Последние два варианта конструктивного исполнения в большей мере приспособлены для формирования в ледовом поле радиальных трещин и снижения размеров отделяемых фрагментов ледового поля. В самом деле, превращение плоской или пологой поверхности обшивки колонны в поверхность с большой локальной кривизной и выполнение наружной полки гофрового профиля более узкой по сравнению с внутренней полкой, а также наличие трубчатых или прутковых профилей обеспечивают высокую степень неравномерности деформирования ледяных полей и ледяных образований (торосов, айсбергов) при взаимодействии с колоннами и высокую концентрацию напряжений в ледяном образовании в зоне контакта с наделками, с полками вертикальных балок или профилями круглого сечения. Эта концентрация приводит к усиленному формированию не только горизонтальных, но и вертикальных трещин в ледовых структурах. Такие трещины, распространяющиеся от полок и профилей круглого сечения в глубину этих структур, вызывают несинхронное отделение фрагментов льда, уменьшение их размеров и снижение ледовых нагрузок на колонны. Для усиления этих эффектов возможно проектирование вертикальных балок с разной высотой по ширине перекрытия. В конечном итоге у проектировщиков сооружений появляется возможность существенного снижения материалоемкости ледового пояса.

Кроме того, включение в состав пояса балки пруткового или трубчатого профилей обеспечивает благоприятное расположение нейтральной оси балки, близкое к середине высоты балки, и ее низкую материалоемкость по сравнению с обычно используемыми балками двутаврового сечения, нейтральная ось которых, как правило, смещена в сторону обшивки перекрытия.

Первый вариант исполнения ледового пояса эффективен при малой толщине льда по сравнению с шириной ледового пояса. В этом случае он (так

же как и известная ледоразрушающая наделка конической формы) способствует разрушению льда изгибом, сопровождающимся малыми ледовыми нагрузками. Кроме того, от мест расположения вертикальных ребер наделок, внедряющихся в ледовое образование, в последнем распространяются в радиальном направлении трещины, также способствующие снижению ледовых воздействий. Однако при большой толщине льда этот вариант сопряжен с необходимостью увеличения размеров пирамидальной наделки, при котором ее эффективность может снижаться из-за роста материалоемкости ледового пояса и из-за увеличения общей нагрузки на колонну. В этом случае целесообразно использовать второй вариант конструктивного исполнения с многорядным расположением пирамидальных наделок, способствующих разрушению льда с образованием сколов. При этом исключается пластическое течение льда и образование из него мелкодисперсных фракций, при которых развиваются большие ледовые давления и силы.

Третий и четвертый варианты исполнения могут использоваться при любой толщине льда. Преимуществом последнего варианта является удобство его применения при выполнении подкрепления ледового пояса действующих морских платформ (например, в случае их модернизации). Кроме того, расположение трубчатого (пруткового) профиля под углом к вертикали не менее  $18^\circ$  обеспечивает разрушение ледового поля изгибом, что значительно снижает ледовые нагрузки на конструкции ледостойких морских платформ.

Эти преимущества выгодно отличают предлагаемые варианты конструктивных решений от традиционных. Их использование обеспечивает снижение общих и локальных нагрузок на сооружения, уменьшение их материалоемкости и повышение экономической эффективности. В случае применения предлагаемого оформления ледового пояса при модернизации сооружений (усилении ледостойких конструкций) обеспечивается уменьшение стоимости доработки пояса.

## Выводы

### Conclusions

Выполненные исследования и разработки привели к следующим основным результатам:

1. Путем анализа отечественного и зарубежного опыта проектирования и строительства ледостойких ППБУ установлены рациональные технические решения и предложены новые архи-

тектурно-конструктивные формы платформ, для которых характерны:

- исключение применения подкрепляющих ППБУ раскосов, пересекающих ватерлинию и увеличивающих ледовые воздействия на платформу;
  - создание ледового (усиленного) пояса на конструкциях, взаимодействующих со льдом, а иногда и установка конических ледоразрушающих наделок;
  - создание защитных конструкций для райзера или специальной центральной колонны, внутри которой располагается райзер;
  - упрощенная форма СК (цилиндрическая с круглым или прямоугольным поперечным сечением);
  - использование двух или трех упрощенных подводных понтонов с СК (по одной или по две на каждый понтон). Подводные понтоны могут соединяться между собой расположенными в горизонтальной плоскости распорками;
  - применение наклонных колонн (либо конических ледоразрушающих наделок), увеличивающих демпфирование качки и снижающих ледовые нагрузки;
  - применение ледорезной формы СК и ледовых зубьев в их подводной части.
2. На основе поиска прогрессивных технических решений, обеспечивающих круглогодичность эксплуатации установок в сложных ледовых условиях и повышение их экономической эффективности, показано, что одним из перспективных вариантов компоновки ледостойкой платформы для арктического шельфа является ППБУ-тримаран с турелью, компоновка и форма которого включает целый ряд инновационных решений для снижения затрат на разведочное бурение.
3. По результатам анализа особенностей разрушения льда предложены новые решения для конструкций ледового пояса, обеспечивающие снижение локальных и глобальных ледовых воздействий на шельфовые сооружения и уменьшение их материалоемкости.

## Библиографический список

1. Плавающие полупогружные буровые установки: история, современность, перспективы. Аналитический обзор. СПб.: ФГУП «Крыловский государственный научный центр», 2014.
2. Крыжевич Г.Б. Концептуальные решения для ледостойких плавающих буровых установок, обеспечивающие круглогодичную эксплуатацию в Арктике // Морские интеллектуальные технологии. 2017. № 3(37). Т. 3. С. 41–47.
3. Крыжевич Г.Б. Проблемы проектирования и перспективы развития ледостойких полупогружных плавающих буровых установок // Арктика: экология и экономика. 2017. № 4(28). С. 108–117.
4. Крыжевич Г.Б. Ледостойкая ППБУ для Арктики // Neftegaz.RU. 2018. № 1. С. 74–78.
5. Крыжевич Г.Б. Новые конструктивные решения для ледового пояса стальных морских сооружений // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 86(370). С. 133–138.
6. Анполонов Е.М., Демешко Г.Ф. и др. Регламентация локальных ледовых нагрузок и проектирование противоледовой защиты морских ледостойких сооружений // Морской вестник. 2016. № 2(58). С. 9–12.
7. Лосет С., Шхинек К.Н. и др. Воздействие льда на морские и береговые сооружения. СПб.: Лань, 2010.
8. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. О модели разрушения льда при большой площади контакта // Механика твердого тела. 2011. № 1. С. 137–153.
9. Гольдштейн Р.В., Осипенко Н.М. О модели разрушения структурированной среды в условиях сжатия // Механика твердого тела. 2010. № 6. С. 86–97.
10. Masterson D., Frederking B., Wright B., Karna T., Maddock W. A revised pressure area curve // Proc. 19<sup>th</sup> Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Cond. Dalian, China, 2007. С. 305–314.
11. Jeffries M.G., Wright W.H. Dynamic Response of «Molikpaq» to Ice – Structure Interaction // Proceedings of the OMAE Conference. Houston, USA, 1988. P. 201–220.
12. Sanderson T.O. Ice Mechanics. Risk to Offshore Structures. London: Graham and Troutman, 1988.
13. Sodhi D.S., Harnza F. Buckling Analysis of a Semiinfinite Ice Sheet. Proceedings of the POAC Conference. 1977. Vol. VI. P. 651–665.
14. Sodhi D.S. Crushing failure during ice-structure interaction // Engineering Fracture Mechanics. 2001. № 68. P. 1889–1921.
15. Sodhi D.S., Haehnel R.B. Crushing ice forces on structures // Journal Cold Region Engineering ASCE. December. 2003. P. 153–167.
16. Wright B.D., Timco G.W. A review of ice forces and failure modes on the Molikpaq // Proceedings of the 12<sup>th</sup> IAHR Ice Symposium. Trondheimj, Norway, 1994. Vol. 2. P. 816–825.
17. Yue Q., Bi X.J. Ice induced jacket structure vibration in Bohai Bay // Journal of Cold Region Engineering. 2000. Vol. 14. № 2. P. 81–91.
18. Kryzhevich G.B., Karulina M.M., Karulin E.B. Experimental study of ice loads in a test basin under action

of granulated and columnar crystal ice on an elastic model // The Proceedings of The 25<sup>th</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference. Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21–26, 2015. P. 1786–1791.

19. Крыжевич Г.Б., Карулина М.М., Карулин Е.Б. Экспериментальное исследование ледовых воздействий на податливую модель морского сооружения в ледовом бассейне // Труды Крыловского государственного научного центра. 2015. Вып. 86(370). С. 139–150.
20. Karulin E., Marchenko A., Karulina M., Chistyakov P., Sakharov A., Ervik A., Sodhi D. Field indentation tests of vertical semi-cylinder on first-year ice // 22<sup>nd</sup> IAHR International Symposium on Ice. Singapore, 2014. P. 179–186.

## References

1. Semi-submersible floaters: history, state of the art, prospects. Analytical review. St. Petersburg, Krylov State Research Centre, 2017 (in Russian).
2. Kryzhevich G. Conceptual solutions of the ice resistant floating drilling units for year-round operation in the Arctic // Marine Intellectual Technologies. 2017. No. 3(37). Vol. 3. P. 41–47 (in Russian).
3. Kryzhevich G. Design problems and development prospects for ice-resistant semi-submersible floating drilling units // Arctic: Ecology and Economy. 2017. No. 4(28). P. 108–117 (in Russian).
4. Kryzhevich G. Ice-resistant semi-submersible for the Arctic // Neftegaz.RU magazine. 2018. No. 1. P. 74–78 (in Russian).
5. Kryzhevich G. New ice belt design solutions for steel offshore structures // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2015. Issue 86(370). P. 133–138 (in Russian).
6. Appolonov Ye., Demeshko G. et al. Assignment of local design loads and design of ice protection structures for marine ice-resistant platforms // Morskoy Vestnik. 2016. No. 2(58). P. 9–12 (in Russian).
7. Sveinung Løset, Karl N. Shkhinek, Ove T. Gudmestad, Knut V. Høyland. Actions from Ice on Arctic Offshore and Coastal Structures. St. Petersburg, Lan', 2010 (in Russian).
8. Goldstein R., Osipenko N. On an ice failure model with a large contact region // Mechanics of Solids. 2011. No. 1. P. 137–153 (in Russian).
9. Goldstein R., Osipenko N. On a model of structured medium fracture under compression conditions // Mechanics of Solids. 2010. No. 6. P. 86–97 (in Russian).
10. Masterson D., Frederking B., Wright B., Karna T., Maddock W. A revised pressure area curve // Proc. 19<sup>th</sup> Int. Conf. on Port and Ocean Eng. under Arctic Cond. Dalian, China, 2007. C. 305–314.
11. Jeffries M.G., Wright W.H. Dynamic Response of «Molikpaq» to Ice – Structure Interaction // Proceedings of the OMAE Conference. Houston, USA, 1988. P. 201–220.
12. Sanderson T.O. Ice Mechanics. Risk to Offshore Structures. London: Graham and Troutman, 1988.
13. Sodhi D.S., Hamza F. Buckling Analysis of a Semi-infinite Ice Sheet. Proceedings of the POAC Conference. 1977. Vol. VI. P. 651–665.
14. Sodhi D.S. Crushing failure during ice-structure interaction // Engineering Fracture Mechanics. 2001. № 68. P. 1889–1921.
15. Sodhi D.S., Haehnel R.B. Crushing ice forces on structures // Journal Cold Region Engineering ASCE. December. 2003. P. 153–167.
16. Wright B.D., Timco G.W. A review of ice forces and failure modes on the Molikpaq // Proceedings of the 12<sup>th</sup> IAHR Ice Symposium. Trondheimj, Norway, 1994. Vol. 2. P. 816–825.
17. Yue Q., Bi X.J. Ice induced jacket structure vibration in Bohai Bay // Journal of Cold Region Engineering. 2000. Vol. 14. № 2. P. 81–91.
18. Kryzhevich G.B., Karulina M.M., Karulin E.B. Experimental study of ice loads in a test basin under action of granulated and columnar crystal ice on an elastic model // The Proceedings of The 25<sup>th</sup> International Ocean and Polar Engineering Conference. Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21–26, 2015. P. 1786–1791.
19. Kryzhevich G., Karulina M., Karulin Ye. Experimental investigation of ice loads on flexible model of offshore structure in ice test tank // Transactions of the Krylov State Research Centre, 2015, Issue 86(370), pp. 139–150 (in Russian).
20. Karulin E., Marchenko A., Karulina M., Chistyakov P., Sakharov A., Ervik A., Sodhi D. Field indentation tests of vertical semi-cylinder on first-year ice // 22<sup>nd</sup> IAHR International Symposium on Ice. Singapore, 2014. P. 179–186.

## Сведения об авторе

Крыжевич Геннадий Брониславович, д.т.н., профессор, начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-72. E-mail: G\_Kryzhevich@ksrc.ru.

## About the author

Gennady B. Kryzhevich, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of Sector, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-72. E-mail: G\_Kryzhevich@ksrc.ru.

Поступила / Received: 25.10.18  
Принята в печать / Accepted: 29.01.19  
© Крыжевич Г.Б., 2019