

## Мировой опыт изучения методов управления ледовой обстановкой

А. И. Костылев<sup>1</sup>,

К. Е. Сазонов<sup>2</sup>, доктор технических наук

ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург

*Приведено общее описание системы управления ледовой обстановкой, исследована классификация траекторий и способов движения ледоколов, способствующих разрушению ледяных образований с целью снижения ледовой нагрузки на защищаемый объект. Анализируются средства и алгоритмы компьютерного моделирования операций по управлению ледовой обстановкой. Рассмотрены нормативные документы расчета ледовых нагрузок и организационные мероприятия по управлению ледовой обстановкой, используемые при планировании освоения новых месторождений на арктическом шельфе. Предложено несколько направлений развития технологии управления ледовой обстановкой.*

**Ключевые слова:** лед, управление ледовой обстановкой, метод, алгоритм, компьютерное моделирование, мировой опыт.

### Введение

На протяжении почти сорока лет проводятся исследования по поиску эффективных решений с целью продления поисково-разведочных работ, добычи углеводородов в арктических условиях, снижения уровня ледовой нагрузки и предотвращения опасных ситуаций, вызванных взаимодействием ледовых полей и торосистых образований с морскими инженерными сооружениями и судами. Весь комплекс этих работ получил обобщенное название технологии управления ледовой обстановкой (ice management).

С первых проектов освоения месторождений в море Бофорта внимание исследователей направлено на изучение вопросов безопасности выполнения эксплуатационных работ и морских операций в Арктике, разработку нормативных документов проектирования морских сооружений, технических средств мониторинга и прогнозирования ледовых

условий, а также на оценку экономических затрат на содержание необходимого количества ледоколов.

Применение технологии управления ледовой обстановкой (УЛО) заключается в совокупности активных действий, направленных на изменение текущих ледовых условий с целью снижения частоты, степени серьезности и неопределенности ледовых воздействий. Эффективное разрушение льда и ледяных образований с помощью ледоколов и судов снабжения позволит в определенных ледовых условиях не только снизить уровень глобальной ледовой нагрузки на сооружения, но и приведет к экономии затрат на содержание ледокольного флота.

Ниже освещен мировой опыт изучения методов управления ледовой обстановкой, направленных на снижение уровня ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения с помощью ледоколов. Основная часть изложенной информации подтверждена натурными и модельными испытаниями, выполненными зарубежными и отечественными исследователями.

<sup>1</sup> e-mail: kostylev\_anton@bk.ru.

<sup>2</sup> e-mail: kirsaz@rambler.ru.



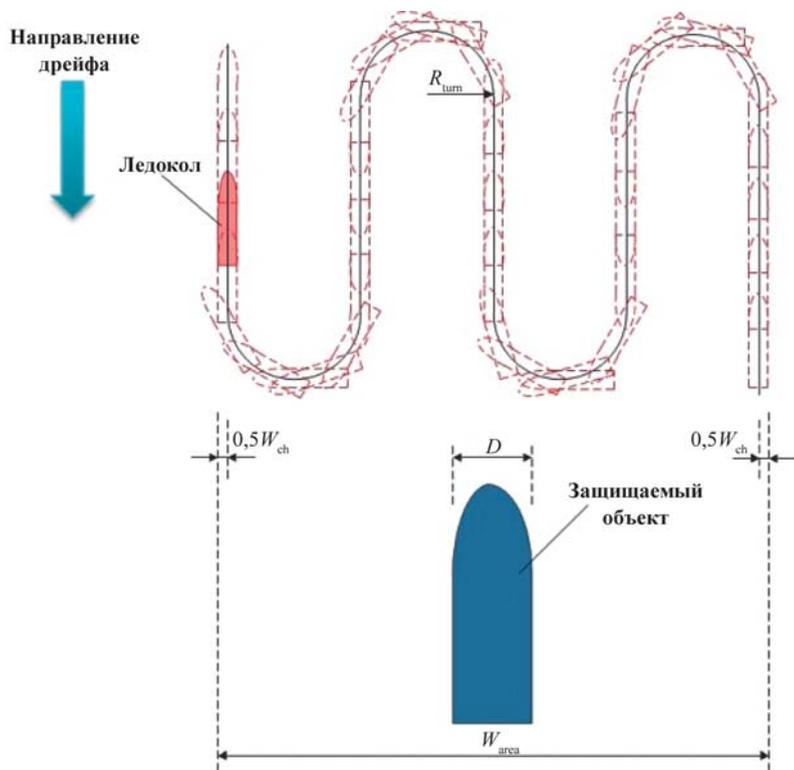


Рис. 2. Линейный метод управления ледовой обстановкой

- космические спутники;
- метеорологические комплексы;
- беспилотные летательные аппараты, квадрокоптеры и вертолеты;
- подводные необитаемые аппараты;
- береговые и судовые радары;
- гидроакустические и ледовые буи;
- лазерный профилометр;
- посты визуального наблюдения за ледовой обстановкой.

Оценка возможностей данной технологии должна выполняться на ранней стадии разработки месторождений нефти и газа и планирования новых морских операций, включающей создание эффективной системы управления ледовой обстановкой и плана ледового менеджмента, определение состава ледокольного флота, изучение гидрометеорологических и ледовых условий в регионе.

**Методы управления ледовой обстановкой с помощью ледоколов**

Целью управления ледовой обстановки с помощью ледоколов является разрушение ледяных образований до состояния крупно- и мелкобитого льда и буксировка крупных ледяных объектов в зоне эксплуатации защищаемого морского инженерного сооружения [1].

В настоящее время накопленная информация позволяет классифицировать основные тактические приемы или траектории движения ледокольных судов, используемые для снижения уровня ледовой нагрузки на морские инженерные объекты, следующим образом:

- линейный метод преодоления льда;
- секторный метод преодоления льда;
- циркуляционный метод преодоления льда;
- подталкивание и буксировка ледяных образований;
- использование азимутальных движительно-рулевых комплексов;

- преодоление торосистых образований;

**Линейный метод** — схема разрушения льда, дрейфующего в направлении защищаемого объекта, используемая ледокольными судами. Траектория главным образом состоит из продольных проходов, параллельных направлению дрейфа льда (рис. 2). В конце каждого прохода ледокольное судно делает поворот на 180° и начинает следующий проход [2]. В конце последнего прохода судно возвращается к исходному положению и начинает новый цикл управления. Во время цикла управления каждое ледокольное судно выполняет более двух проходов против дрейфа льда, а другую половину — по дрейфу льда, что, в свою очередь, приводит к различным ледовым сопротивлениям на этих участках и соответственно к скоростям движения ледокольных судов при заданном режиме энергетической установки.

Количество проходов определяет площадь покрытия или область разрушения ледяного покрова, зависящую от ширины сооружения, скорости дрейфа, характеристик ледокольной ходкости и маневренности судна.

Условие, определяющее максимальный радиус циркуляции судна при имеющейся информации о движении льда и скоростных характеристиках ледокола, можно записать так:

$$R \leq \frac{m(L + W_{ch} + y_{min}) - NL}{|Nk\pi - 2m|}, \quad (1)$$

где  $m = \frac{V_{ship}}{V_{ice}}$  — отношение скорости дрейфа льда к скорости движения ледокола;  $L$  — длина прохода (галса);  $W_{ch}$  — ширина ледового канала;  $y_{min}$  — минимальное безопасное расстояние;

$$N = \text{ceil} \left( \frac{X_{area} - W_{ch}}{W_{ch} + d_{target}} \right) \text{ — расчет}$$

общего количества проходов;

$$k = \frac{V_{\text{ship}}}{V_{\text{circ}}} \text{ — отношение скорости}$$

движения ледокола на прямолинейном участке к скорости на циркуляции;  $X_{\text{area}}$  — фронт движения ледокола по ширине;  $d_{\text{target}}$  — расстояние между проходами.

Если ледокольное судно обладает достаточными маневренными характеристиками во льду, рассчитанными по приведенному условию, то корпус защищаемого объекта будет взаимодействовать с разбитыми на части отдельными льдами, что значительно снизит ледовую нагрузку.

Эта схема преодоления льда часто используется, когда скорость дрейфа льда высока, а направление дрейфа льда остается довольно постоянным.

Такой способ движения ледокола предлагается, например, для поддержания бесперебойного функционирования морской ледостойкой стационарной платформы «Приразломная» [3]. В данном случае рассматриваются только два параллельных прохода и одна циркуляция.

**Двойной линейный проход.**

Один из главных недостатков линейной техники заключается в том, что для выполнения данного тактического маневра требуется выполнение поворотов с малым диаметром циркуляции ледокольного судна для достижения достаточного уровня управления дрейфующим льдом. Для уменьшения целевого размера плавучей льдины был предложен новый подход, заключающийся в том, что по завершении первого цикла управления второй цикл осуществляется через середину уже сломанной плавучей льдины, образовавшейся после первого цикла (рис. 3). При этом новый радиус поворота вдвое больше радиуса поворота на первом цикле управления относительно целевого размера плавучей льдины.

Общее время выполнения тактического маневра, требующееся ледокольному судну для

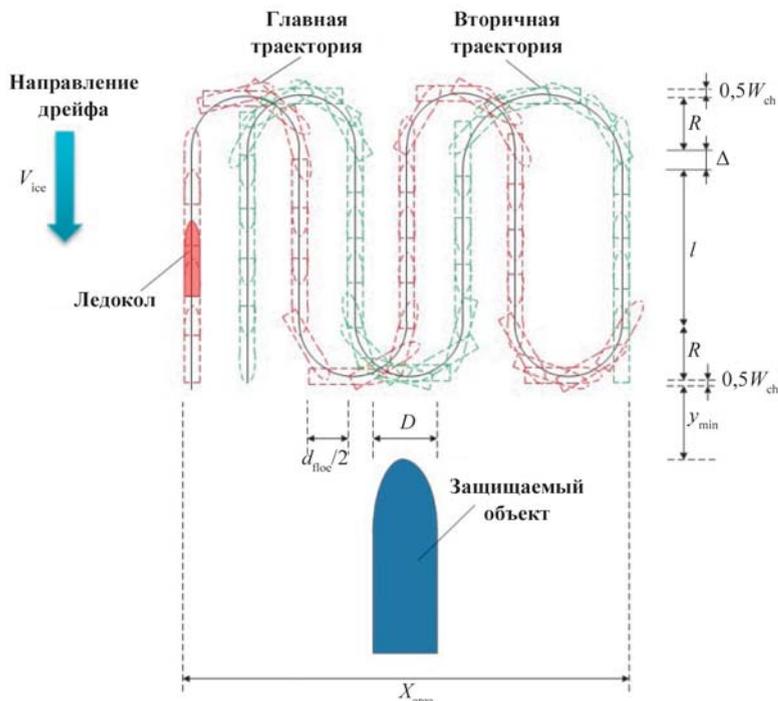


Рис. 3. Двойной линейный проход

уменьшения целевого размера льдины (и соответственно уменьшения вероятности возникновения критических нагрузок), можно выразить соотношением

$$t_{>II} = \frac{L(1,5N + 2) + R[1,5\pi(Nk_1 + k_2) - 1]}{V_{\text{ship}}}, \quad (2)$$

где  $k_1$  — отношение скорости на прямолинейном участке к скорости на циркуляции в первом цикле управления;  $k_2$  — отношение скорости на прямолинейном участке к скорости на циркуляции во втором цикле управления.

**Секторный метод.** При использовании секторного метода (рис. 4а) обеспечивается управление приближающимся льдом в довольно широкой области. При этом ледокольное судно ломает лед перпендикулярно направлению дрейфа, двигается назад и вперед между двумя курсовыми углами, которые создают сектор. Необходимость работы в некотором секторе, имеющем в плане вид трапеции, меньшее основание которой равно ширине защищаемого сооружения в направлении дрейфа льда, обусловлено локальной неравномерностью дрейфа льда. Из-за наличия этой неравномерности ледокол должен разрушать все большую площадь ледяного покрова по мере удаления от защищаемого объекта.

Данная схема типично используется как при незначительной скорости дрейфа льда, так и тогда, когда направление дрейфа льда является переменным или быстро изменяется.

К секторному методу можно отнести траекторию, при которой ледокол двигается галсами перед защищаемым объектом, совершая попеременно движение то носом, то кормой вперед [4]. На рис. 4б представлена такая схема движения ледокола при защите инженерного сооружения.

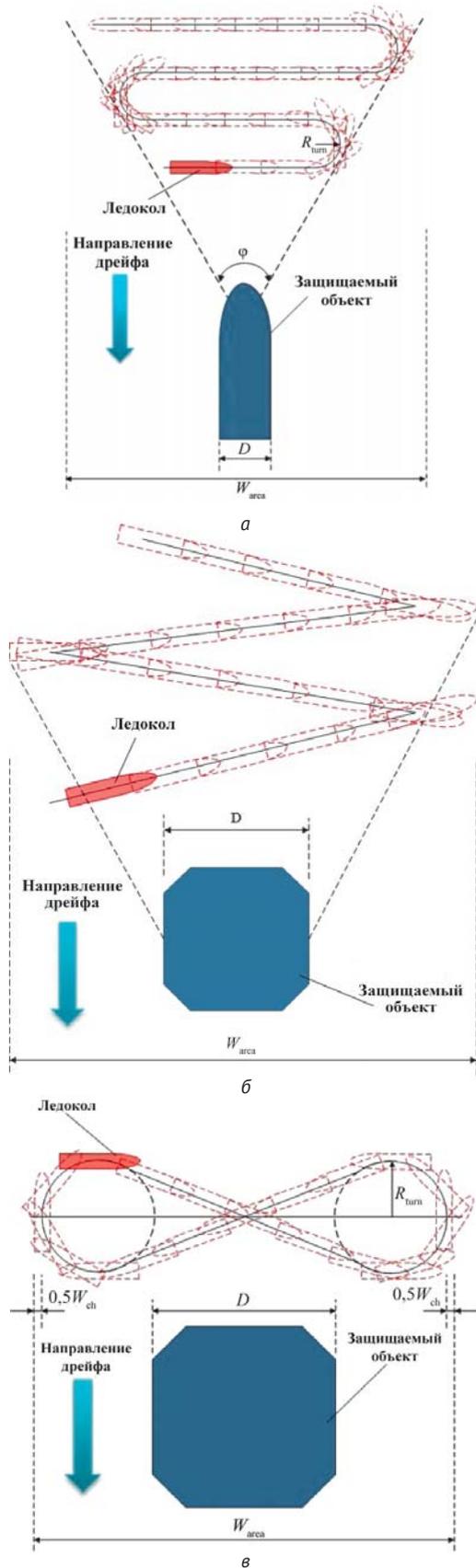


Рис. 4. Секторный метод управления ледовой обстановкой: а – змейка, б – переменное движение носом – кормой, в – восьмерка

В некоторых случаях судно движется по траектории, имеющей форму восьмерки (рис. 4в).

Оценку выполнения маневра «змейка» по времени можно произвести по формуле

$$t_{>11} = \frac{l_0 + (N-1)k\pi R + N(l_0 + 2NR \operatorname{ctg} \alpha)}{V_{\text{ship}}}, \quad (3)$$

где  $l_0 = D + 2 \left| -H \operatorname{ctg} \alpha - R \operatorname{ctg} \alpha + \frac{R}{\sin \alpha} \right|$  — расстояние для начального участка траектории;  $D$  — ширина защищаемого сооружения;  $\alpha = \frac{\pi - \varphi}{2}$ ;  $\varphi$  — угол сектора;  $H = \frac{W_{\text{ch}}}{2} + y_{\text{min}}$  — дистанция начального удаления от объекта;  $N$  — количество проходов.

Очевидно, что при такой схеме движения прямолинейные участки будут увеличиваться по сравнению с предыдущим прямолинейным участком на величину  $4R \operatorname{ctg} \alpha$ .

Общее время выполнения маневра переменного движения носом — кормой можно рассчитать по формуле

$$t_{\text{ship}} = \frac{\sum_{i=1}^N l_i}{V_{\text{ship}}} + (N-1)t_{\text{turn}}, \quad (4)$$

где  $\sum_{i=1}^N l_i = l_1 \frac{1-q^N}{1-q}$ ;  $q = \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin(\alpha - \beta)}$ ;  $\beta$  — угол курса;

са;  $l_1 = \frac{L \sin \alpha}{\sin(\alpha - \beta)}$ ;  $L = D + 2H \operatorname{ctg} \alpha$ ;  $t_{\text{turn}}$  — время

выполнения разворота.

Формула (4) соответствует формуле нахождения  $n$  первых членов геометрической прогрессии. Таким образом, можно рассчитать общее расстояние, которое пройдет ледокол в рассматриваемом тактическом приеме.

Неравенство для определения толщины ровного льда, при которой возможно выполнение описанной технологии:

$$h_l \leq \frac{h_{\text{lim}}}{V_w - V_{\text{lim}}} \left( V_w - V_{\text{ice}} \sqrt{C^2 + 1} \right), \quad (5)$$

где  $C = \left[ 2(M + 2pr) / d \right] + 2p$ ;  $h_{\text{lim}}$  — предельная ледопробитность ледокола;  $V_w$  — скорость движения ледокола на чистой воде;  $V_{\text{lim}}$  — минимальная устойчивая скорость ледокола в предельных льдах;  $M$  — размер сооружения в направлении, перпендикулярном направлению дрейфа льда;

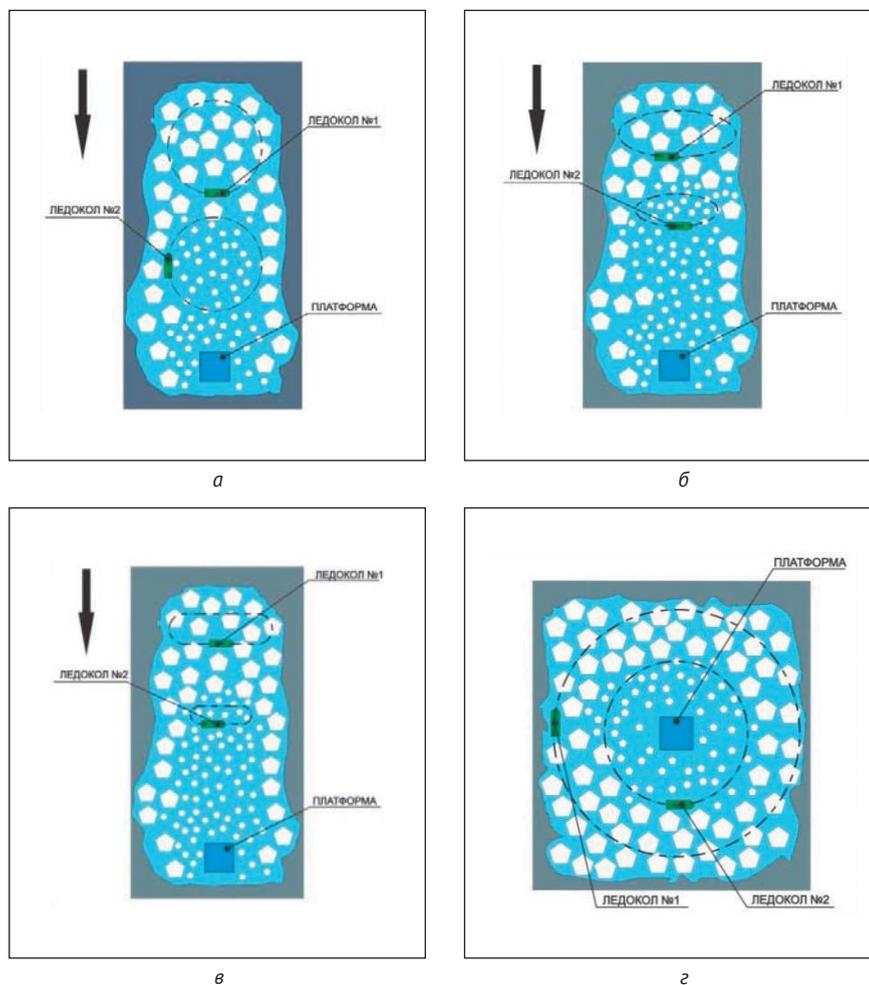


Рис. 5. Циркуляционный метод управления ледовой обстановкой: круговая (а), эллиптическая (б), кольцевая (в) и орбитальная (г) траектории

$p = \frac{V_{ice Y}}{V_{ice X}}$  — коэффициент пропорциональности между скоростью дрейфа льда в поперечном направлении и скоростью движения в преобладающем направлении;  $r$  — конечное расстояние от защищаемого объекта до точки остановки выполнения маневра в перпендикулярном направлении;  $d$  — величина максимального расстояния между каналами.

**Циркуляционный метод.** Традиционный тактический прием — описывание ледоколом или группой ледоколов циркуляций перед защищаемым объектом (рис. 5) [5]. Радиус циркуляций определяется в зависимости от скорости дрейфа и маневренных характеристик судна обеспечения. Циркуляционные траектории преодоления льда имеют следующие разновидности: круговую, эллиптическую, кольцевую и орбитальную. Применение двухступенчатой схемы, в которой участвуют два ледокольных судна, значительно повышает общую эффективность операций по управлению ледовой обстановкой.

Эта группа схем типично используется на высоких концентрациях тонкого льда или толстых льдин небольшого диаметра, при изменяющемся направлении дрейфа льда.

Выражение для определения величины минимального радиуса циркуляции ледокола для случая защиты объекта, например танкера, загружающегося в ледовых условиях с подводного загрузочного устройства или платформы, можно записать так:

$$R = \frac{p(M + d) + 0,5B}{V_{circ} - (2\pi V_{ice X} + V_{circ})p} V_{circ}, \quad (6)$$

где  $V_{circ}$  — скорость ледокола на циркуляции;  $M, B$  — длина и ширина защищаемого объекта.

**Подталкивание льда.** Данная техника является эффективным способом перемещения средних и больших льдин с линии дрейфа. Обычно подталкивание происходит под прямым углом к приближающемуся льду. Преимущество перемещения большой



Рис. 6. Применение азимутальных движительно-рулевых комплексов

льдины по сравнению с разбиванием состоит в том, что угроза для морского инженерного сооружения удаляется с линии дрейфа, а при разбивании остатки могут по-прежнему представлять угрозу. В большинстве зафиксированных случаев для подталкивания крупных льдин использовались два совместно работающих судна.

Буксировку айсбергов также можно отнести к этому методу, так как угроза возникновения опасной ситуации ликвидируется вследствие изменения курса ледяных образований. В таких случаях применяются синтетический и стальной канат, ледовые сети. Подробнее с практическим применением и теоретическими исследованиями данного приема можно ознакомиться в [6—9].

**Применение азимутальных движительно-рулевых комплексов** для предотвращения скапливания около защищаемого объекта небольших частей льда, даже при их высокой концентрации, может быть очень эффективным, что подтверждается опытом, полученным на Сахалине [10]. В этом случае судно обеспечения практически остается стационарным и повернуто против дрейфа льда вблизи платформы (рис. 6). Струи гребных винтов также применяются для отклонения осколков айсберга и размыва килей торосистых образований.

Следует иметь в виду, что выполнение указанной технологии возможно только в относительно тонких льдах, которые легко разрушаются струями от гребных винтов. Кроме того, при повороте винто-

рулевых колонок на борт судно практически лишается способности двигаться, что существенно снижает возможность эффективного применения указанного метода.

Многообразие траекторий ледоколов обусловлено, во-первых, многообразием конкретных ледовых условий и возможностью движения в них ледокола, во-вторых, целью управления (например разрушением ледяного покрова до определенного размера льдины). Чем сложнее ледовые условия, тем хуже становятся ходовые и маневренные характеристики ледоколов. В таких условиях судно совершает циркуляции с большим радиусом поворота и не всегда может достичь требуемого уровня управления ледовой обстановкой.

К факторам, снижающим эффективность выполнения тактического приема, относятся размеры защищаемого объекта или сооружения, увеличение скорости дрейфа льда, увеличение неравномерности дрейфа.

При выборе тактического приема и определении основных его параметров необходимо исходить из конкретных размеров защищаемого объекта и окружающей его акватории, динамики движения судна и характеристик дрейфующего льда. Основным параметром является время выполнения цикла управления  $t_{\text{общ}}$ , зависящее от ширины области управления  $W_{\text{area}}$ , радиуса циркуляции судна во льду  $R$ , скорости прямолинейного движения судна во льду  $V_{\text{ship}}$ , целевого размера льдины  $d_{\text{пос}}$ .

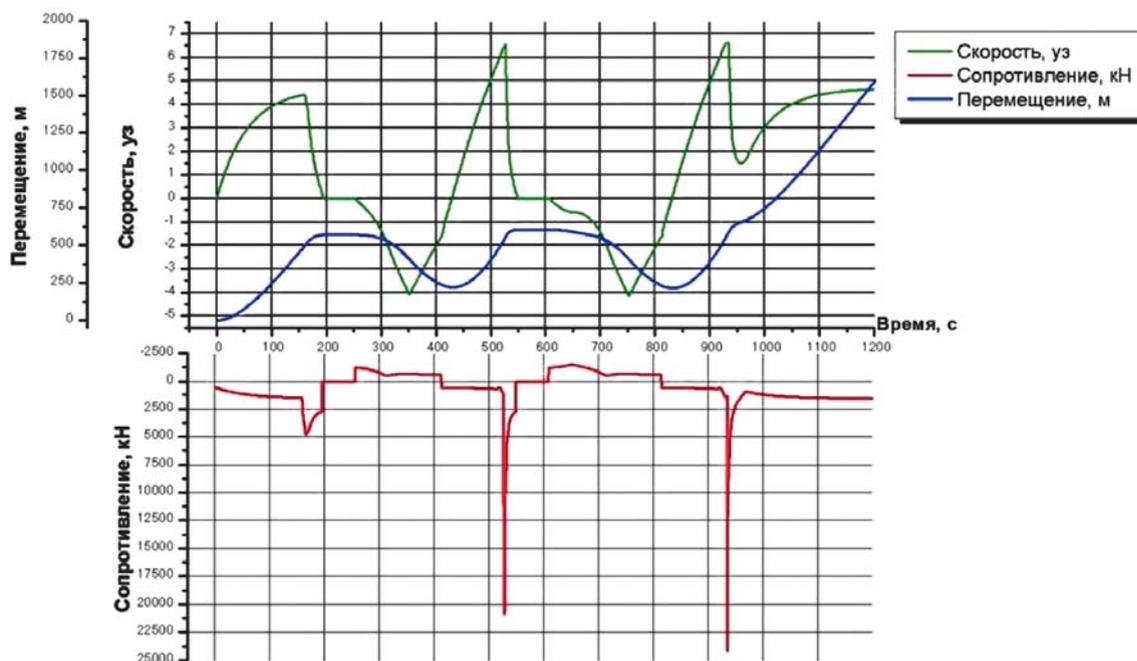


Рис. 7. Графики изменения выходных переменных

При управлении ледовой обстановкой, по-видимому, не всегда должна ставиться задача разрушения большой площади льда перед сооружением. В некоторых случаях для оказания эффективной помощи защищаемому сооружению достаточно разрушить ледяной покров в некоторой локальной области. Например, для защиты пассивно позиционирующего турельного судна достаточно разрушить определенные области в непосредственной близости от корпуса. Такое локальное разрушение дает существенный эффект [11].

**Преодоление гряд торосов.** Гряда торосов — сравнительно прямолинейное нагромождение битого льда, образовавшееся в результате неравномерности дрейфа льда и связанных с ним ледовых сжатий. Торосистые образования представляют наибольшую угрозу для защищаемого объекта. Все теоретические и экспериментальные данные показывают, что при взаимодействии с торосом на судно или офшорное сооружение действует наибольшая ледовая нагрузка.

В настоящее время еще нельзя окончательно утверждать, что с помощью технологий УЛО можно справиться с любым торосистым образованием. Очевидно, что достаточно мощный ледокол может разрушить консолидированный слой тороса, если он существует. На подводную часть торосов — киль, состоящий из слабосвязанных ледяных блоков, — ледокол способен воздействовать в меньшей степени. При прохождении ледокола через торос, по-видимому, нарушается связность блоков, а также он несколько деформируется. Подобные изменения в структуре тороса, несомненно, приводят к снижению уровня ледовой нагрузки на сооружение,

но исключить возможность его взаимодействия со всей массой килля тороса не удастся. Тем не менее теоретические исследования показывают, что общий уровень глобальной ледовой нагрузки, действующей на сооружение с наклонной передней гранью при взаимодействии с торосистым образованием, может быть снижен на 11—12% уже при первом проходе ледокола через него [12].

Задача о нахождении наиболее эффективной тактики разрушения торосистых образований с помощью ледоколов остается нерешенной. Ниже приводятся результаты теоретических исследований, позволяющих оценить время разрушения тороса ледоколом в случае, когда ледокол вынужден работать для этого набегам.

Работа судна набегам — один из способов разрушения тяжелых ледяных образований, представляющих наибольшую опасность для морских инженерных сооружений. В [13] разработан метод расчета сопротивления ледокольных судов при форсировании торосистых образований, необходимого количества набегов и времени выполнения тактического приема в первом приближении. При этом учитываются геометрия тороса и характеристики движительно-рулевого комплекса судна. Практический интерес имеет определение общего количества набегов в зависимости от ширины торосистого образования.

В качестве примера проведения расчетов был выбран дизель-электрический ледокол пр. 21900 типа «Москва», модельные испытания которого проводились в ледовом опытовом бассейне ФГУП «Крыловский государственный научный центр». На рис. 7 приведены графики изменения выходных переменных, полученные по указанному методу.

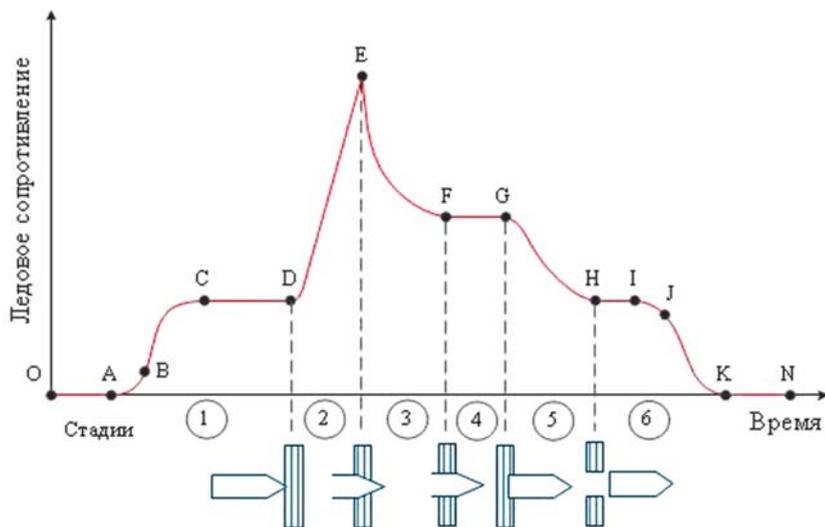


Рис. 8. Схематическое представление ледового сопротивления в торосе

Согласно многим экспериментальным исследованиям, выполненным в гамбургском опытовом бассейне, ледовое сопротивление судна, преодолевающее торосистое образование, может быть схематично описано в шести стадиях, представленных на рис. 8 [14].

В целом изменение сопротивления при математическом моделировании работы набегами дизель-электрического ледокола «Москва» соответствует картине, приведенной на рис. 8. Однако процессы, происходящие на четвертой и пятой стадиях, слабо выражены. Это связано с тем, что длина цилиндрической вставки или средней части ледокола достаточно мала.

Разработанный метод, основанный на результатах модельных испытаний, позволяет предсказывать среднюю скорость преодоления судном широких торосистых гряд. Этот метод может быть применен и как эффективный инструмент оптимизации маршрута в различных морских транспортных системах.

### Средства и алгоритмы моделирования операций по управлению ледовой обстановкой

Одно из средств моделирования операции по управлению ледовой обстановкой — тренажерные комплексы и комплексы физического моделирования, повышающие практические навыки взаимодействия всех участников операций ледового менеджмента и снижающие риски возникновения аварийных ситуаций в море.

В последние годы все чаще в литературе встречаются материалы, содержащие информацию о компьютерных программах, позволяющих исследовать методы управления ледовой обстановкой. Во ФГУП «Крыловский государственный научный центр» уже ведутся разработки аналогичных программ как для учебных и научных целей, так и для внедрения

в перспективные проекты освоения месторождений в Арктике. Эти программы, использующие отечественные методики расчета ледовых нагрузок, будут дополнены базой данных с результатами экспериментальных исследований различных корпусов судов и платформ.

В статье немецких исследователей [2] описывается инструмент моделирования физических операций ледового менеджмента. Сопротивление в ровном льду, плавучих битых льдах, при преодолении торосов, а также маневренность во льду оцениваются с помощью полуэмпирических методов, признанных немецким классификационным сообществом. За основным параметром управления принимается целевой размер плавучей льдины, исходя из значения которого рассчитывается траектория движения судна для защиты морского инженерного сооружения от надвигающегося дрейфующего льда согласно линейному, секторному или циркуляционному методам управления. Инструмент производит визуализацию операций со значением требуемого уровня мощности энергетической установки и распределениями получающегося размера плавучей льдины.

Программное обеспечение построено по модульному принципу. Он заключается в разбиении исходной задачи на простые подзадачи. Это позволяет легко и оперативно вносить изменения в математический аппарат, при этом значительно уменьшается время перекомпиляции. На рис. 9 представлен алгоритм моделирования операций по управлению ледовой обстановкой.

Моделирование начинается с ввода входных данных: параметров ледовых условий, параметров и характеристик судна, параметров защищаемого объекта и цели управления. Целью управления могут быть размер плавучей льдины, уровень мощности энергетической установки, время выполнения цикла управления, область управления, угол сектора управления, количество набегов на торос, значение радиуса циркуляции и др.

Следующим идет блок расчета управляющих воздействий: сил и моментов движительно-рулевого комплекса (ДРК) и подруливающих устройств. Согласно характеристикам движителей на чистой воде ледокольного судна их тяга оценена как функция мощности на валу и возможного значения степени ледяного фрезерования. Входными данными для расчета являются геометрия руля и винта, координаты расположения относительно корпуса судна, коэффициенты упоров и моментов, число оборотов

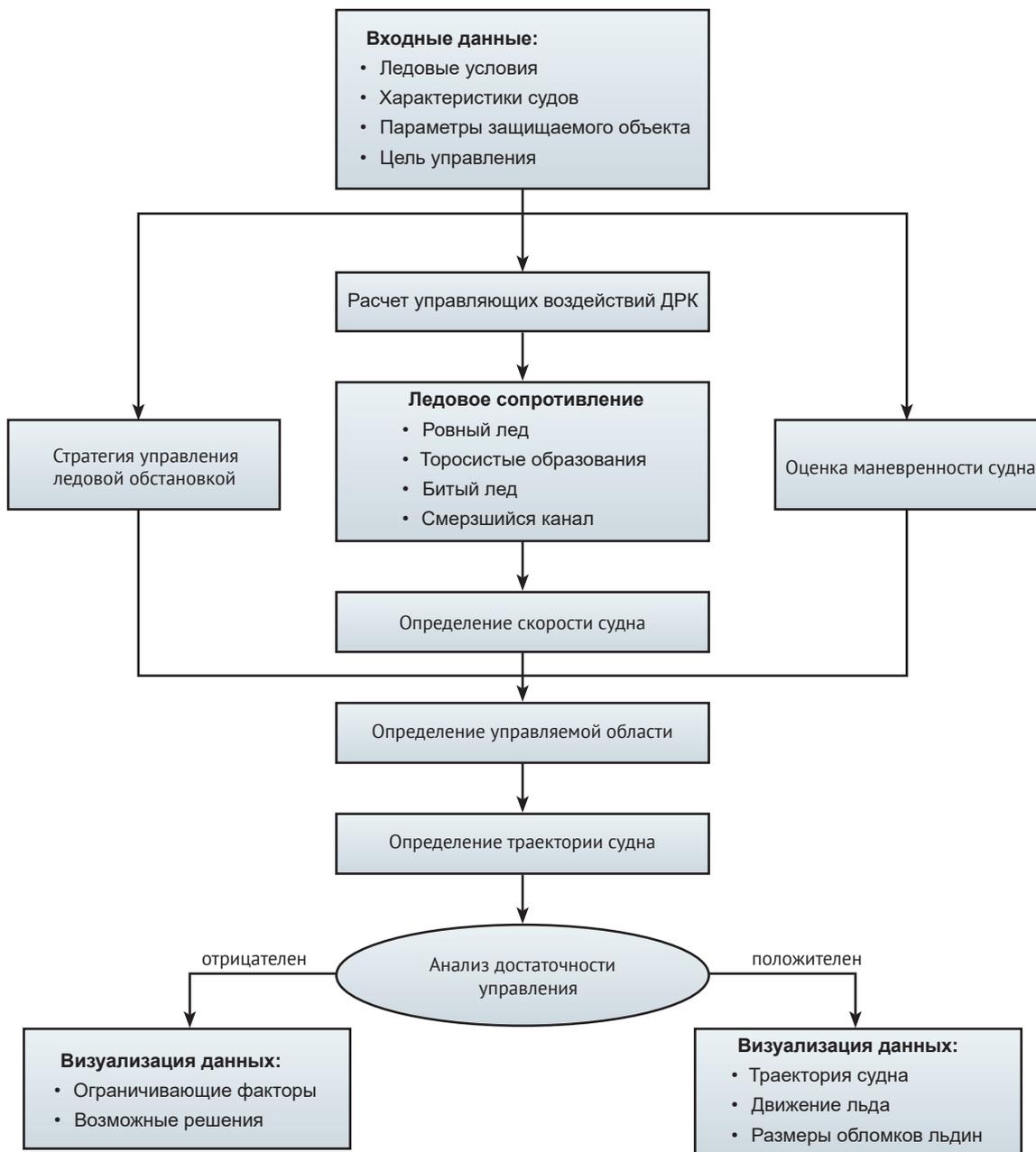


Рис. 9. Алгоритм моделирования операций по управлению ледовой обстановкой

и угол перекладки пера руля или винто-рулевой колонки (ВРК).

Одним из основных блоков является расчет ледового сопротивления. В зависимости от типа ледового образования (ровный лед, гряда торосов, битый лед, смерзшиеся каналы и лед в условиях сжатия) производится расчет ледового сопротивления при прямолинейном движении для выбранной формы корпуса судна.

В соответствии с заданной мощностью на валу двигателя и оценкой сопротивления определяется равновесная точка движения ледокола в битых льдах или в ровном льду. В моделировании

рассматривается случай, когда уровень мощности задан как входной параметр. Расчет производится до тех пор, пока не будет найдена устойчивая скорость, при которой упор гребного винта равняется ледовому сопротивлению.

После вычисления параметров сопротивления при прямолинейном движении важной точкой моделирования является оценка маневренности судна. Данный блок производит оценку параметров маневрирования судна, выполняющего predetermined поворот. К таким параметрам относятся уровень мощности движителя, угловая скорость, угол перекладки руля/ВРК.

## Кораблестроение для Арктики

Стратегия управления ледовой обстановкой заключается в выборе наиболее подходящего метода и последовательности действий для достижения поставленной цели управления.

Определение максимальной ширины управляемой области производится с учетом наибольшего радиуса циркуляции судна при заданном уровне мощности движителя для обеспечения требуемой цели управления, например определенного размера плавучей льдины.

В любой момент процесса моделирования программного обеспечения сообщает пользователю о невозможности достижения требуемого уровня управления ледовой обстановкой. В этом случае программное обеспечение выводит на экран ограничивающие факторы, причину возникшей проблемы (недостаточная скорость преодоления льда, чрезмерная скорость дрейфа льда и др.) и предлагает несколько решений (повышение скорости преодоления льда или управляемого размера плавучей льдины). Если результат анализа достаточности управления по соответствующим критериям положителен, то производится визуализация процесса моделирования с построением траектории движения судна и ледяного покрова, отображением размеров обломков льдин, появляющихся после взаимодействия с корпусом судна или платформой.

### Нормативные документы расчета ледовых нагрузок и организации операций по управлению ледовой обстановкой

К настоящему времени разработанные методики по определению ледового сопротивления судов и глобальной ледовой нагрузки, действующей на сооружения, для различных ледовых условий позволили сформулировать ряд правил и норм проектирования в виде стандартов и гостов. К таким документам относятся правила Российского морского регистра судоходства, СНИП 2.06.04-82, BCH 41.88, DNV Ships for Navigation in Ice, финско-шведские правила [15—20]. Перечисленные стандарты освещают вопросы проектирования морских инженерных сооружений, ледоколов и судов ледового плавания. В них представлены процедуры расчета предельных нагрузок, необходимые для расчета металлоемкости корпусов и конструкций, а также проектирования движительного комплекса судов.

Однако только в стандарте ISO 19906 содержится раздел об управлении ледовой обстановкой с помощью ледоколов [21]. По мнению авторов данной статьи, необходимо проводить организационные мероприятия по введению раздела, связанного с управлением ледовой обстановкой, в Российский морской регистр судоходства, а разработчикам обустройства конкретного морского месторождения необходимо детально подходить к разработке плана ледового менеджмента, регламентирующего руководство по реализации мероприятий в случае ледовой опасности. План УЛО должен:

- быть в наличии на всех морских сооружениях, судах системы управления ледовой обстановкой, а также во всех других местах, где присутствует персонал, принимающий участие в морских операциях;
- определять область применимости и предполагаемый перечень процедур управления ледовой обстановкой;
- содержать спецификации оборудования, используемого в процедурах управления ледовой обстановкой, и рекомендации по его применению;
- содержать перечень производственных операций, которые могут выполняться на сооружении при наличии льда на акватории;
- содержать перечень ледовых ситуаций, которые требуют выполнения процедур УЛО, и в случае необходимости соответствующих превентивных мер на сооружении.

При разработке плана ледового менеджмента внимание уделяется определению границ зон безопасности и временных интервалов реагирования с учетом гидрометеорологических, ледовых и физико-географических условий района, в пределах которых осуществляются контроль и управление ледяными образованиями. Например, по плану ледового менеджмента, разработанного для защиты буровой платформы «Kulluk» от ледового воздействия, были приняты следующие зоны безопасности [6]:

- зона обнаружения ледяных образований;
- зона ранней угрозы;
- зона раннего предупреждения;
- зона останова буровых операций и принятия решения об отсоединении;
- зона отсоединения и ухода с точки бурения.

Очевидно, что план ледового менеджмента должен адаптироваться в зависимости от сезона бурения и при изменяющихся ледовых условиях, а также быть одним из основных элементов аварийно-предупредительной системы морского инженерного сооружения и входить в состав поста управления морскими операциями.

### Заключение

Анализ мирового опыта исследования ледового менеджмента показывает, что в настоящее время нет механизма или математического аппарата, позволяющего определить наиболее эффективный тактический прием, который может быть использован для конкретного сценария ледовых условий.

В связи с этим авторы статьи предлагают несколько направлений развития рассматриваемой технологии:

1. Оценка эффективности, совершенствование и разработка новых тактических приемов разрушения ледяных образований или их комбинаций. В качестве критерия эффективности тактических приемов в зависимости от цели могут быть выбраны различные технические или экономические показатели процесса снижения уровня ледовой нагрузки:

- оценка тактического приема по быстрдействию, реализующего критерий минимального времени переходных процессов;
  - оценка тактического приема по энергетическим затратам, реализующая критерий минимума расхода топлива;
  - оценка экстремальных значений параметров (характеристики взаимодействия защищаемого объекта со льдом, радиус циркуляции и скорость движения судна, безопасная дистанция и другие показатели) относительно нормальных значений в пределах допустимых ошибок для конкретных ледовых условий, реализующая критерий минимума среднеквадратичной ошибки;
  - оценка тактического приема по точности, формирующаяся по критерию минимума отклонения переменных за время переходных процессов.
2. Повышение роли модельного эксперимента в УЛО и внедрение новых технологий в процесс проведения модельных испытаний: установка видеокамер фиксации движения отдельных ледовых образований на всей площади ледового бассейна, точная регистрация траекторий движения судов во время выполнения циркуляций в ровном льду и возможности выхода судна из ледяного канала и др.
3. Выработка рекомендаций по выбору состава ледокольного флота или характеристик корпусов судов, планируемых в проведении ледового менеджмента для конкретного месторождения при заданных ледовых условиях.
- Литература**
1. Сазонов К. Е. Теоретические основы плавания судов во льдах. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2010. — 274 с.
  2. Hisette Q., Jochmann P., Bronsart R. Simulation of Ice Management Operations // Proceedings of the Twenty-fourth (2014) International Ocean and Polar Engineering Conference Busan, Korea, June 15—20, 2014. — P. 1043—1051.
  3. Ямщиков Д. В., Проняшкин А. А., Карулин Е. Б. Управление ледовой обстановкой — активное мероприятие по поддержанию бесперебойного функционирования МЛСП «Приразломная» // Тр. 12-й Международной конференции и выставки по освоению ресурсов нефти и газа российской Арктики и континентального шельфа стран СНГ. — СПб., 2015. — С. 309—312.
  4. Сазонов К. Е. О возможности использования ледоколов для снижения ледовой нагрузки на морские инженерные сооружения // Мор. вестн. — 2007. — № 4. — С. 71—74.
  5. Bakkay B., Coche E., Riska K. Efficiency of ice management for arctic offshore operations // ASME 2014 Proceedings of the 33<sup>rd</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. — Vol. 10: Polar and Arctic Science and Technology. — San Francisco, California, USA, June 8—13, 2014 San Francisco, California, USA, June 8—13, 2014. — (Paper OMAE2014-24038). — doi:10.1115/OMAE2014-24038.
  6. Eik K. J. Ice Management in Arctic Offshore Operations and Field Developments: Thesis for the degree of philosophy doctor. — Trondheim, 2010.
  7. Dunderdale P., Wright B. Pack ice management on the Southern Grand Banks offshore Newfoundland, Marine and Engineering Consultants and Surveyors Canada. — [S. l.], Mar. 2005.
  8. McClintock J., McKenna R., Woodworth-Lynas C. Grand Banks Iceberg Management: PERD/CHC Report 20-84. — Ottawa, 2007.
  9. Сазонов К. Е. Буксировка айсбергов // Ученые зап. Рос. гос. гидрометеорол. унта. — 2012. — № 23. — С. 91—99.
  10. Keinonen A., Martin E. Ice Management Experience in the Sakhalin Offshore with Azimuth Icebreakers // ICETECH08. — Banff, Alberta, Canada, 2008.
  11. Апполонов Е. М., Сазонов К. Е. Ледовый менеджмент: задачи и возможности // Газовая промышленность. — 2013. — № 2 (686). — С. 70—72.
  12. Костылев А. И. Оценка эффективности применения ледоколов при защите морского инженерного сооружения от действия торосистых образований // Тр. Крылов. гос. науч. центра. — 2015. — Вып. 88 (372).
  13. Костылев А. И., Сазонов К. Е. Метод расчета сопротивления судна при работе набегами // Судостроение. — 2015. — № 5. — С. 24—27.
  14. Ehle D. Ships Breaking through Sea Ice Ridges. Simulation of Ice Management Operations // Proceedings of the Twenty-second (2012) International Ocean and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece, June 17—22, 2012. — P. 1188—1193.
  15. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений. — СПб.: РМРС, 2012. — 155 с.
  16. Правила классификации, постройки и оборудования ПБУ и МСП. — СПб.: РМРС, 2014. — 488 с.
  17. СНИП 2.06.04-82. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов). — М., 2012.
  18. ВСН 41.88. Проектирование ледостойких стационарных платформ. — М.: Мингазпром, 1988. — 137 с.
  19. Rules for classification of ships. — Pt. 5. — Chap. 1: Ship for navigation in ice. — [S. l.]: Det Norske Veritas, 2013.
  20. Guidelines for the application of the finish — Sweden ice class rules: Trafik/21816/03.04.01.01/2011. — Helsinki, 2011.
  21. ГОСТ Р ИСО 19906.