

Исследование воздействия подводного взрыва на ледовый покров

© А.С. Савин, Н.И. Сидняев, М.А. Теделури

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Представлены результаты исследований особенностей деформирования и разрушения ледового покрытия при воздействии близкого подводного взрыва, а также горизонтально установленных цилиндрических оболочек при совместном действии взрыва и гидростатического давления. Исследования базируются на результатах компьютерного моделирования процессов подводного взрыва и деформирования ледового покрова. Показано, что в условиях совместного действия на оболочку близкого подводного взрыва и большого гидростатического давления определяющее влияние на характер и параметры деформирования и разрушения ледового покрова оказывает вторая пульсация пузыря. Установлена зависимость взрывостойкости льда от глубины и мощности заряда. Выявлено влияние основных физических параметров льда на взрывоспротивляемость. Результаты исследований могут быть использованы при создании конструкций, эффективно сопротивляющихся воздействию близкого подводного взрыва.

Ключевые слова: подводный взрыв, гидростатическое давление, деформация, разрушение, эксперимент, компьютерное моделирование

Введение. При распространении энергии подводного взрыва в водной среде образуются поверхности, на которых скачком меняются гидродинамические элементы жидкости (давление, плотность, температура, скорость движения частиц) либо их производные по времени и по расстоянию [1–3]. Для оценки воздействия импульсов давления, генерируемых взрывом, на объекты типа ледяной плиты, были проведены эксперименты, в которых измерялись импульс, который передается потоком двухфазной среды, создаваемой взрывом в трубе, поршню, помещенному в нее, и работа, совершаемая продуктами [4, 5]. Несмотря на значительные потери, измеренные величины импульса и работы продемонстрировали высокую эффективность рассматриваемых зарядов в воздействии на преграды. К настоящему времени проведены сравнительные численные расчеты воздействия взрыва на плиту льда взрывами заряда тринитротолуола (ТНТ) и заряда гетерогенной смеси [5–7]. Расчеты показали существенную разницу в качественной картине разрушений, производимых волной сжатия от взрывов зарядов ТНТ и от смесового. Значительная деформация льда в случае взрыва смесового заряда наблюдается позднее, чем в расчетах для ТНТ, а траектории движения раскошенной массы имеют иной вид.

Цель настоящей статьи — оценить воздействия подводного взрыва на ледовый покров с использованием разработанной математиче-

ской модели, проследить во времени динамику деформирования и разрушения льда, а также установить влияние массы заряда и его заглубления на степень разрушения льда.

Сравнительные оценки полученных результатов о разрушении подводных препятствий различной толщины генераторами импульсов с зарядами тротила представлены в [8–10]. Расчеты показывают, что при воздействии ударной волны при взрыве тротила качественная картина разрушений сохраняется независимо от массы выбранного заряда. Так, образующаяся струя выбивает из ледяной плиты круг и поднимает фонтан обломков и воды сквозь образовавшееся отверстие на высоту до двух десятков метров. При этом энергия заряда расходуется в основном на сообщение выброшенной массе потенциальной энергии. В практических условиях такое разрушение считается неэффективным и свидетельствует о недостаточной глубине заложения заряда. В случае с дополнительным воздействием на лед волны сжатия от генератора импульсов происходит мягкое нагружение плиты. Проведенные численные эксперименты с генератором импульсов показывают далеко не полное возможное разрушение, площадь образовавшейся майны превосходит почти в 7 раз площадь майны от заряда тротила с массой в 10 раз большей. Полученные результаты можно сравнивать только качественно и только между собой, несмотря на то что результаты численных экспериментов по разрушению льда зарядами тротила количественно соответствуют эмпирическим [11–14]. В работе [3] приведены зависимости эффективной массы разрушенного льда от времени для взрывов зарядов ТНТ и алюминийсодержащей смеси, что подтверждает эффективность воздействия на ледяную плиту волны сжатия, рожденной новым зарядом. В каждый момент времени во всей расчетной области подсчитывается число элементов конечно-разностной сетки, обладающих отличной от нуля кинетической энергией, т. е. начавших движение, и умножается на массу элементарной ячейки (это допустимо, так как начальные размеры элементов во всей расчетной области одинаковы). Предполагается, что начавшие двигаться элементы можно считать отделившимися от основной плиты, и, следовательно, масса всех таких элементов будет определять долю разрушенного к определенному моменту льда. Для сравнения между собой зависимости для расчетов действия зарядов различной массы и плит различной толщины выведены совместно.

Анализ механизмов дробления льда и ледяных покровов. Исследования в [15, 16] показывают, что удельный расход q аммонита марки 6ЖВ изменяется от 0,3 до 1,5 кг/м³ и зависит от прочности льда, заданного диаметра майны, требуемой степени дробления льда и допустимого радиуса разлета осколков льда. Например, при $q = 0,3$ кг/м³ майна не образуется, взрыв только раскалывает на крупные куски отдельные небольшие льдины (ледяные поля больших

размеров не раскалываются). При $q = 0,5 \text{ кг/м}^3$ образуется майна, диаметр которой в 3–3,5 раза больше глубины погружения заряда, почти полностью забитая крупными осколками льда. Майна диаметром в 4 раза больше глубины погружения заряда в воду образуется при $q = 0,3 \text{ кг/м}^3$. Она более свободна от осколков льда, которые мельче и разбрасываются дальше за пределы майны. Последующее увеличение расчетного удельного расхода взрывчатого вещества (ВВ) приводит к образованию майны еще большего диаметра и более свободную от осколков льда в результате большего его дробления. Наибольший диаметр майны, особенно в тонком льду, может превышать глубину погружения заряда примерно в 7–8 раз. Для зарядов нормального выброса расчетный удельный расход q аммонита 6ЖВ принимают равным $1,5 \text{ кг/м}^3$. При дроблении сплошных массивов льда для определения массы заряда рыхления (при взрывании уступами) расчетный удельный расход аммонита 6ЖВ принимают равным $0,4...0,5 \text{ кг/м}^3$. При использовании ВВ, отличных от аммонита 6ЖВ, необходимо умножить значение расчетного удельного расхода ВВ на переводной коэффициент по теплоте взрыва. Расстояние между зарядами зависит от их массы, условий взрывания, характера выполняемой работы и длины пути, который проходит взорванный лед до объекта и изменяется примерно от 1,25 до 4 диаметров майны. Диаметр майны обычно равен 4 м. Расстояние между зарядами принимают равным 5...15 м. При образовании майны у защищаемого объекта взрывами одиночных зарядов в зажиме расстояние между зарядами принимают равным 4...5 м. При наличии закраины майны (полыньи), когда взрывы проводят в зажиме, расстояние между зарядами увеличивают до 10...15 м. При раскалывании ледяного покрова выше объекта взрывами одиночных зарядов расстояние между зарядами увеличивают до 10 м.

Для раскалывания льда на большей площади, учитывая, что действие взрыва распространяется во все стороны с одинаковой силой, заряды следует располагать на расстоянии 5...15 м от свободной кромки ледяного покрова 1, льдины или затора (рис. 1). На рисунке представлена схема силового воздействия подрыва подводным аппаратом 2 на ледяной покров 1. Область низкого давления 2 создается подрывом заряда 3, а область высокого давления 7 — зарядом 5 за счет специально направленного 6, 8 подрыва. Разнонаправленные силовые воздействия создают изгибающий момент 9 на ледяной поверхности, что приводит к раскалыванию льда с последующим разрушением.

При массовом взрыве заряды можно располагать по квадратной сетке и в шахматном порядке. Наиболее равномерное распределение энергии взрыва и, следовательно, дробление льда достигается при шахматном расположении. Массу подводных сосредоточенных зарядов аммонита 6ЖВ, оптимальную глубину погружения их в воду и расстояния между ними можно определить по таблице.

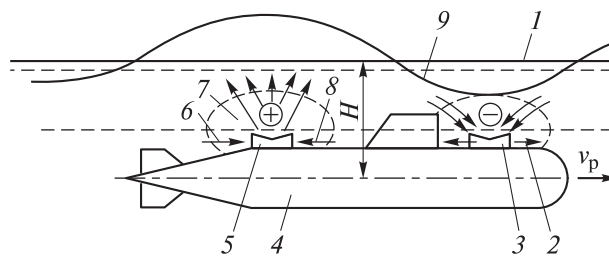


Рис. 1. Схема разрушения ледовой поверхности:
 v_p — направление перемещения подводного аппарата на глубине H

Параметры сосредоточенных подледных зарядов

Толщина льда, м	Оптимальная глубина погружения заряда H , м	Масса заряда, кг	Расстояние между зарядами R , м	Глубина рыхления W , м		
				5	10	15
0,2–0,3	1,3	1,1	2,0	6,5	13	19,5
0,3–0,4	1,4	1,4	2,5	7,0	14	21,0
0,4–0,5	1,5	1,7	3,0	7,5	15	22,5
0,5–0,6	1,6	2	3,7	8,0	16	24,0
0,6–0,7	1,7	2,7	4,8	8,5	17	25,5
0,7–0,8	1,9	3,4	6,2	9,5	19	28,5
0,8–0,9	2,1	4,6	8,3	10,5	21	31,5
0,9–1,0	2,3	6,1	11,0	11,5	23	34,5
1,0–1,1	2,5	7,8	14,1	12,5	25	37,5
1,1–1,2	2,7	9,8	17,7	13,5	27	40,5
1,2–1,3	2,9	12,2	22,0	14,5	29	43,5
1,3–1,4	3,1	14,9	26,8	15,5	31	46,5
1,4–1,5	3,3	18,0	32,3	16,5	33	49,5

Приведенные в работах [8–16] расчетные формулы не учитывают всех факторов, от которых зависит масса заряда. Однако они устанавливают глубину погружения заряда в воду так, чтобы майна и зона треснувшего ледяного покрова имели наибольшие размеры при необходимом дроблении и выбросе льда. Для взрыва ледяного покрова, если позволяют местные условия, рекомендуется использовать заряды массой не менее 2...3 кг и не более 10 кг, так как более легкие заряды приводят к увеличению трудоемкости и сроков выполнения работ, а заряды большой массы неудобны в применении.

Взрыв подводного заряда, расположенного на оптимальной глубине, образует майну, разрушая площадь ледяного покрова, которая в 1,5–2 раза больше, чем при взрыве того же заряда в толще льда. Если эффективность взрыва характеризовать объемом разрушенного льда,

отнесенного к единице массы заряда, то для внутренних зарядов рыхления (при взрывании сплошных ледяных массивов уступами) он равен 2,2, а для подводных — 7,8 м³/кг. Объясняется это тем, что ледяной покров расположен на пути распространения гидроударной волны взрыва и газового пузыря, направленных больше в сторону границы льда и воздуха и, следовательно, покрова. При погружении заряда на глубину, примерно в 1,5 раза большую оптимальной, лед взрывом не выбрасывается, а только вспухает и раскалывается на крупные куски (см. рис. 1). При взрыве того же заряда на еще большей глубине происходит лишь небольшой подъем (всплеск) воды через лунку. Эффект подводного взрыва увеличивается, если заряд взрывается на дне (или недалеко от него), так как при этом гидроударная волна отражается от грунта.

Для дробления льда и ледяных заторов используют наружные, внутренние и подледные заряды. Наружные и внутренние могут быть сосредоточенными и удлиненными. Они применяются в основном для устройства лунок основных зарядов, разрушения льдин и ледяных заторов. С точки зрения удельного расхода ВВ наружные заряды самые неэкономичные. Внутренние устанавливают в толще льда, выемках, устраиваемых заблаговременно вручную, механическими средствами и с использованием наибольших по массе зарядов ВВ. Подледные заряды помещают под толщей льда в воде на оптимальной глубине. Они наиболее эффективны по удельному расходу ВВ, их масса примерно в 1,5–2 раза меньше массы наружных зарядов и в 0,5–0,8 раза меньше массы внутренних зарядов. Масса сосредоточенных подледных зарядов определяется расчетным путем, где ВВ при удельном расходе K принимают следующие значения:

при $K = 0,3 \text{ кг/м}^3$ — происходит рыхление льда без ограничения майны;

$K = 0,5 \text{ кг/м}^3$ — во льду образуется майна диаметром $(3–3,5)W$, полностью заполненная битым льдом;

$K = 0,9 \text{ кг/м}^3$ — образуется майна диаметром $4W$, очищенная ото льда, причем расстояние между зарядами $R = (5–12)W \text{ м}$.

Линия наименьшего сопротивления W в расчетах принимается в зависимости от толщины льда h , м:

$W = 1,5...2 \text{ м}$ при $h = 0,4 \text{ м}$;

$W = 2...3,5 \text{ м}$ при $h > 0,4 \text{ м}$.

Здесь расстояние между зарядами составляет $(5–15)W$. При дноуглубительных работах общий расход ВВ составит

$$Q = K_n W_n S,$$