

МОДЕЛИ РАЗРУШЕНИЯ АЙСБЕРГОВ И СТАМУХ ВЗРЫВАМИ И ОЦЕНКИ РИСКОВ ИСХОДОВ ВЗРЫВАНИЯ

Г.А.ЛЕБЕДЕВ, В.П.ТРИПОЛЬНИКОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт

Рассмотрены теоретические модели разрушения взрывами ледовых образований (ЛО) типа айсбергов и стамух для обеспечения безопасной эксплуатации подводных сооружений в замерзающих морях. Дается теоретическая оценка рисков исходов взрывания ЛО и рекомендации по учету эффектов канализации энергии взрывов для обеспечения благоприятного исхода взрывания.

В соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 10 апреля 2007 г. № 442-р Росгидромету совместно с заинтересованными органами исполнительной власти поручено в 2007–2010 гг. разработать систему гидрометеорологической безопасности в Российской Федерации.

Несомненно, что компонентом этой системы должен быть комплекс методов, технологий и технических средств, направленных на предотвращение техногенных аварий и катастроф, связанных с воздействием природной среды на инженерные объекты, или уменьшение негативных последствий от указанных воздействий.

Применительно к обеспечению эффективного и безопасного развития регионов России в условиях существования замерзающих акваторий одним из определяющих гидрометеорологических факторов воздействия природной среды на жизнедеятельность можно считать ледяной покров и связанные с ним проблемы и явления. В этой связи главной задачей современной инженерной гляциологии в области хозяйственной деятельности является нахождение новых путей и способов целенаправленного воздействия на гляциальную среду, изучение воздействия этой среды на хозяйственные объекты и установление закономерностей изменчивости того и другого.

В рамках данной работы обсуждаются результаты исследований, связанные с проблемами техногенного воздействия на ледяные образования (ЛО) типа айсбергов и стамух с целью их разупрочнения и разрушения для обеспечения безопасной эксплуатации подводных сооружений (ПС) в замерзающих морях. Так, для обеспечения безопасности в виде исключения возможности тарана айсбергом подводного сооружения требуется, по меньшей мере, разделить айсберг на части, каждая из которых имела бы безопасную осадку или была бы транспортабельна буксировочными приемами. Такое разделение может осуществляться короткозамедленным взрыванием (КЗВ) цепочки скважинных зарядов взрывчатых веществ (ВВ), при котором реализуется наименьшее акустическое воздействие на окружающую среду и наиболее экономично решается поставленная задача. Эта методика запатентована нами как «Способ защиты подводных сооружений от давления дрейфующих ледовых образований» [2].

Для достижения эффекта одноактного обрушения всего массива льда ЛО массу заряда ВВ в каждой скважине устанавливают исходя из требования, чтобы зона трещин во льду от взрыва каждого заряда достигала нижней границы массива

ЛО и чтобы зоны трещин от отдельных взрывов смыкались. Это достигается выбором расстояния между скважинами по линии замедления взрывной цепи, равного удвоенной глубине первоначальной осадки ЛО. Такой выбор обеспечивает минимизацию числа скважин, повышение эффективности защиты подводных сооружений от давления ЛО и исключение экологического ущерба.

Рассмотрим теоретическую модель этого явления. Согласно теории [6] от взрыва сосредоточенного заряда зона трещин в породе в направлении уплотнения среды заканчивается на расстоянии от заряда, определяемом уравнением

$$\hat{R} = R_g \left(\frac{\sigma_c}{2\sigma_p} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где R_g – радиус зоны бризантного действия взрыва, σ_c – прочность породы на сдвигание в условиях стеснения, σ_p – прочность породы на растяжение.

$$R_g = \left(\frac{E}{3\sigma_c} \right)^{1/3} \times R_0, \quad (2)$$

где E – модуль Юнга породы, R_0 – радиус газовой полости, образуемой в эпицентре взрыва продуктами детонации.

Для камуфлетного взрыва в соответствии с теорией радиус газовой полости может быть определен уравнением

$$R_0 = 0,61(qM)^{1/3} (\rho c^2 \sigma_c^2)^{-1/9}, \quad (3)$$

где q – удельная энергия ВВ, M – масса заряда ВВ, ρ – плотность породы, c – скорость упругой волны сжатия в породе.

При взрывах в забутованных скважинах формула (3) также может соответствовать реальной ситуации ввиду мгновенного характера расширения продуктов детонации.

Примем для расчета следующие характеристики льда [1]: $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$; $c = 3200 \text{ м/с}$; $E = (3 \div 10) \times 10^3 \text{ МПа}$; $\sigma_p = 0,5 \text{ МПа}$; $\sigma_c = 40 \text{ МПа}$. Делая подстановки, получим уравнения (4–6), определяющие: радиус газовой полости R_0 ; радиус зоны бризантного действия взрыва R_g и радиус зоны трещин \hat{R} .

$$R_0 = 1,25 \cdot 10^{-3} (qM)^{1/3}, \text{ а по тротилу } R_0 = 0,2M^{1/3}, \quad (4)$$

$$R_g = (2,92 \div 4,37) R_0, \text{ а по тротилу } R_g = (0,59 \div 0,88) M^{1/3}, \quad (5)$$

$$\hat{R} = 6,32R_g = (18,4 \div 27,6) R_0, \text{ а по тротилу } \hat{R} = (3,72 \div 5,58) M^{1/3}, \quad (6)$$

где M – в кг, R – в м.

Критическую массу заряда ВВ в скважинах, гарантирующую обрушение ЛО, определим из требования $\hat{R} = H$, где H – глубина первоначальной осадки ЛО. В тротиловом эквиваленте согласно уравнению (6) получим для массы заряда уравнение

$$M = \left(\frac{H}{3,72 \div 5,58} \right)^3 \cong (0,006 \div 0,02) H^3. \quad (7)$$

При этом оптимальное расстояние между скважинами вдоль подрывной цепи равно $2H$.

Ударная волна во льду от взрыва тротила имеет пик давления, который в соответствии с экспериментальными данными [4, 7] определяется отношением

$$p^* = \frac{M}{R^3} \cdot \quad (8)$$

В предлагаемом способе ударная волна на границе ЛО с водой практически отсутствует, так как в соответствии с уравнениями (7) и (8) $p^* = (0,006 \div 0,02)$ МПа, а предел обращения затухающей ударной волны в обыкновенную волну сжатия во льду равен $0,66 \div 1,66$ МПа. Это позволяет утверждать, что предлагаемый способ безопасен для ПС при проведении взрывов на сравнительно небольших дистанциях от ПС, а для некоторых ПС даже при наличии их контакта с ЛО.

Чтобы исключить возможность тарана подводного сооружения стамухой, требуется, по меньшей мере, удалить от ее массива часть льда, обеспечив тем самым подвсплытие стамухи до безопасного уровня. Пусть H – глубина моря, h – эффективная высота надводной части стамухи, привязанная к условному миделю, L – протяженность стамухи в условном главном сечении, S – сечение массива льда в плоскости условной ватерлинии. Если требуется изменить осадку стамухи на величину ΔH , то следует удалить с нее массу льда, определяемую уравнением

$$\Delta M = S \cdot \Delta H \cdot \rho, \quad (9)$$

где ρ – плотность воды.

Эффективно отделить массу льда и обеспечить подвсплытие стамухи можно, например, отколом льда вдоль одного из протяженных бортов L . Для этого заряды ВВ необходимо разместить по цепочке подрывной линии, установленной на таком расстоянии ΔX от борта, чтобы масса отделяемого льда определялась уравнением

$$\Delta M = \Delta X \cdot (H + h) L \cdot \rho_i, \quad (10)$$

где ρ_i – плотность льда.

Т.е. это расстояние ΔX определится соотношением

$$\Delta X = 1,08 S \cdot \Delta H / (H + h) L. \quad (11)$$

Известно, что дневная поверхность крупных ледовых образований может иметь рельеф и качество состояния льда, исключаящие возможность оперативного выбуривания скважин для установки зарядов. Применение кумулятивных зарядов существенно снижает трудоемкость подготовки взрывного разрушения ледовых образований. При этом цепочка кумулятивных зарядов устанавливается на дневной поверхности айсберга или стамухи [5]. При пробивании льда кумулятивным зарядом образуется конусообразная каверна раздробленного льда, имеющая диаметр, определяемый уравнением

$$2R_g = 0,627 A \cdot d \cdot V (\rho_c \rho_i)^{0,25}, \quad (12)$$

где A – эмпирический коэффициент вытеснения, d , V – диаметр и скорость кумулятивной струи, которые уменьшаются по мере углубления струи в породу, ρ_c , ρ_i – плотности материала струи (обычно медь) и льда.

Для мишени в виде льда и медной кумулятивной струи $A = 2,7$ (Дж^{-1/2}мм^{3/2}) [5].

В момент соударения со льдом $V = 8$ км/с (для условий гексогенового заряда), d выбирается соответственно конструкции заряда (диаметра).

Глубина конусной каверны раздробленного льда определяется уравнением

$$h_1 = l (\rho_c \rho_i)^{1/2} f, \quad (13)$$

где l – длина струи, f – коэффициент фокусировки, зависящий также от прочности материала пробиваемой преграды.

Для условий: $d = 0,05$ м, $V = 8000$ м/с, $\rho_i = 950$ кг/м³, $\rho_c = 5000$ кг/м³ (медь), получим $R_g = 0,5$ м.

Согласно (8) сферическую каверну радиуса 0,5 м дает скважинный заряд тротила массой 0,8 кг, а зона трещин в массиве льда распространяется на 2–3 м. В случае кумулятивного заряда зона трещин распространяется на данное расстояние также и от вершины конусной каверны.

Риск невыполнения произведенными взрывами поставленной задачи разрушения айсберга или стамухи связан с неопределенностью рассеяния энергии взрывов отдельных зарядов в цепочке. Так как энергия взрывов канализируется в направлении наименьшего сопротивления, то требуются известный опыт и знание строения объекта разрушения, а также специальные знания об оптимальной дистанции между зарядами и времени задержки последовательности взрывов по цепочке.

В идеализированном варианте однородного изотропного льда давление ударной волны, определяемое (8), по размерности адекватно плотности энергии, затраченной на дробление льда (МПа = МДж/м³). Но если часть энергии взрыва канализируется в непредсказуемом направлении, то убыль энергии разрушения в нужном направлении можно сопоставить с уменьшением действующей массы заряда или с увеличением расчетной массы заряда, необходимой для достоверного исхода разрушения льда в данной конкретной ситуации по характеристикам массива льда. Реально оценить вероятность выполнения поставленной задачи как отношение

$$p = M^*/M, \quad (14)$$

где M^* – масса заложенного заряда (имеются в виду одинаковые заряды в каждой скважине или одинаковые кумулятивные заряды), M – масса заряда, гарантирующая достоверный исход взрывания на данном объекте. Можно утверждать, что эта величина p совпадает с КПД взрывания.

Вероятность неблагоприятного исхода равна $(1 - p)$. Категория риска такого исхода, как мера неопределенности, равна относительной энтропии информационной системы, определяемой соотношением [3]:

$$R = -\{p \log p + (1 - p) \log (1 - p)\} / \log 2. \quad (15)$$

Приемлемый уровень риска, как правило, устанавливается нормативно. Например, вероятность благоприятного исхода должна быть не меньше 0,95. В этом случае $R = 0,286$ (табл. 1).

Максимальный риск исхода имеет место при вероятности $p = 0,5$, а вероятность негативных случайных факторов канализации энергии, в данном случае (p^*), определяется произведением $0,95p^* = 0,5$, т.е. $p^* = 0,526$. Если вероятность благоприятного исхода взрывания оценивается величиной 0,5, что соответствует неподготовленному заложению заряда, то вероятность канализации энергии взрыва в непредсказуемом направлении равна 1. Следовательно, для подстраховки от проявления возможных негативных факторов канализации энергии взрывов необходимо (и достаточно) вдвое увеличить массу расчетного заряда, т.е. увеличить вдвое массу заряда фактического заложения.

С другой стороны, разность $(1 - R) = 0,714$ (компенсируемая энтропия) может быть увеличена дополнительной информацией. Например, дуальная

Таблица 1

Вероятности и риски дуального исхода											
p	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
R	0,286	0,468	0,731	0,88	0,987	1	0,987	0,88	0,731	0,486	0,286

информационная система с риском 0,714 имеет вероятности исходов примерно 0,8 и 0,2. Чтобы ее исключить из максимального риска и получить риск достоверного исхода $R \leq 0,286$, надо определить коэффициент канализации энергии по местам дислокации зарядов с вероятностью не менее 0,8 и скорректировать позиции заложения зарядов. Если планируется использование N скважин, из которых n могут быть дефектными, то их число регулируется соотношением $n/N \leq 0,2$. Информационная система ошибок заложения зарядов может быть многофакторной, но риск компенсируемой информационной системы (в данном случае $R = 0,714$) от этого не изменяется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богородский В.В., Гаврило В.П. Лед. Физические свойства, современные методы гляциологии. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 384 с.
2. Лебедев Г.А., Трипольников В.П. Способ защиты подводных сооружений от давления дрейфующих ледовых образований: Патент на изобретение № 2310720 по заявке № 2006115028/03(016345) с приоритетом от 02.05.2006.
3. Лебедев Г.А., Трипольников В.П. Информационные риски в оценке угрожающих воздействий льда на сооружения и воздействия взрывов, устраняющих ледовые нагрузки // Труды RAO/CIS OFFSHORE 2007 PROCEEDING. СПб., 2007. С. 121 (полная версия доклада опубликована на CD-диске информационных материалов RAO/CIS OFFSHORE 2007).
4. Лебедев Г.А., Трипольников В.П. Разрушение ледяного покрова подледными взрывами газовых смесей для обеспечения технической и экологической безопасности эксплуатации инженерных объектов // Труды RAO/CIS OFFSHORE 2005 PROCEEDING. СПб. 2005., С. 480–483.
5. Ледов С.В., Копалов В.Н., Федоров С.В. Особенности пробития ледяных и грунтобетонных преград кумулятивными зарядами // Оборонная техника, 1995. № 4. С. 39–45.
6. Физика взрыва / Под ред. Л.П.Орленко. М.: Физматгиз, 2002. Т. 1. 832 с.
7. Mellor M., Kovacs A. Destruction of ice islands with explosives // POAC 77, 4-th Int. Conf. Port and Ocean Eng., Newfoundland, 1977. Vol. 2. P. 753–765.

G.A.LEBEDEV, V.P.TRIPOLNIKOV

MODELS OF DESTRUCTION OF ICEBERGS AND GRAUNDED HUMMOCKS BY EXPLOSION AND ASSESSMENT OF BLASTING RESULTS RISKS

The essay considers theoretical models of destruction of ice formations like icebergs and grounded hummocks by explosion, with the purpose to ensure safe operation of submarine constructions in freezing seas. Theoretical assessment of ice formations blasting results risks is given along with recommendations for regarding explosion energy channeling effects for the purpose to ensure favorable outcome of the detonation.