

РАЗРАБОТКА СПОСОБА И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОМ РАЗРУШЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ НАЛЕДЕЙ ВЗРЫВАМИ

д-р физ.-мат. наук Г.А.ЛЕБЕДЕВ,
канд. физ.-мат. наук В.П.ТРИПОЛЬНИКОВ

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, e-mail: aaricoop@aari.nw.ru

Представлены результаты разработки нового способа очистки инженерных сооружений от наледей с использованием взрыва топливозвоздушной смеси (ТВС) и соблюдением условий безопасного применения предлагаемой технологии. Рассмотрены физические и технические основы способа. Дается пример расчета необходимой плотности распределения поджигающих зарядов и их массы, а также массы требуемого топлива, при его полном выгорании в воздухе при сохранении стехиометрической концентрации в облаке заряда ТВС, для удаления наледи со сварной конструкции.

Ключевые слова: способ, технология, разрушение, атмосферные наледи, взрыв, топливо-воздушные смеси.

Обледенение представляет серьезную угрозу работоспособности технических устройств и сооружений и может приводить к аварийным ситуациям, поэтому существует потребность принятия экстренных эффективных мер по очистке сооружений от наледей.

К известным способам борьбы с обледенением относятся различные варианты антиадгезионной обработки поверхности конструкции, например гидрофобными покрытиями [7].

Анализ термодинамических параметров динамики обледенения, рассмотренных в работе [1], свидетельствует, что величина адгезии морского льда к разным поверхностям при различных температурах подложки имеет порядок 0–0,5 МПа и пресноводного льда до 1,5–2,0 МПа. Она определяется методом отрыва или среза льда с поверхности. Еще один аспект физической природы адгезии льда до настоящего времени оставался неисследованным. Дело в том, что при замерзании воды на поверхности материала, на поверхности смачивания появляются дефекты структуры льда, связанные с расширением воды при замерзании. Можно назвать эти дефекты контактными микротрещинами, которые в механизме адгезионного захвата играют ослабляющую роль. Поскольку контактные микротрещины ориентируются вдоль поверхности обледенения, то должно быть существенное различие адгезионной прочности на срез вдоль поверхности подложки и на отрыв, перпендикулярный этой поверхности. Существует простой бесконтактный способ исследования адгезии льда на отрыв.

В условиях охлаждения до известных температур образцов различных пробных материалов проводят намораживание льда на поверхностях этих образцов. Помешают образцы в герметический стеклянный сосуд. Откачивают воздух из сосуда и наблюдают за давлением в нем. Ледяные пластинки отваливаются от под-

ложки образцов в процессе вакуумирования сосуда. Максимальный отрицательный перепад давления в сосуде при этом равен атмосферному давлению (0,1 МПа).

Эксперимент с медной подложкой при температуре жидкого азота показал именно этот результат. Объяснение этому результату пока единственное: трещиностойкость адгезионного контакта льда и подложки имеет решающее значение при удержании наледей. Величина адгезионной прочности на отрыв оказывается весьма мала, поэтому достаточно кратковременного вакуумирования среды, чтобы снять наледь. Данный результат и другие ниже приводимые критические условия навели на идею способа очистки сооружений от наледей в масштабах промышленных конструкций [5].

Радикальным средством ударного воздействия можно считать взрыв, в частности взрыв топливо-воздушной смеси (ТВС). В известном способе разрушения льда из подводного положения [3] в воду погружают оболочку, снаряженную иницирующими зарядами, закачивают в нее газовое топливо и окислитель и подрывают. При реализации этого способа в военном деле [4] объемно-детонирующую ТВС распрыляют вышибным зарядом и поджигают вторым зарядом, замедленным относительно первого. В этих способах масса вышибных и иницирующих зарядов не ограничивается требованиями безопасности сооружения. Поэтому применение этих вариантов взрыва ТВС для удаления наледей, образующихся на сооружениях, не является безопасным для этих сооружений и рациональным в отношении использования энергии ТВС.

Суть способа, предложенного нами, направлена на повышение эффективности и снижения трудоемкости очистки сооружений от наледей с соблюдением условий безопасного применения предлагаемой технологии. Физические и технические основы способа заключаются в следующем.

Взрывы ТВС производят ударно-вибрационное воздействие на сооружение. Если облако ТВС примыкает к обледеневшим конструкциям, обволакивая их, то при взрыве ТВС на наледь воздействуют: 1) ударная волна, имеющая пик давления порядка 2–3 МПа [4]; 2) волны сжатия, отраженные от границ с невозмущенной средой, которые инвертируются в волны разряжения; 3) волна, образующаяся после выгорания смеси (примерно через 0,1–0,5 с в зависимости от ее объема и состава) в облаке с продуктами сгорания и связанная с отрицательным перепадом давления до уровня ниже атмосферного, который сменяется повторным ударным сжатием облака [8].

Наледи представляют собой сплоченный массив льда – «ледовую шубу» на элементах конструкции. Чтобы отделить «шубу» от конструкции требуется сначала фрагментировать ее, т.е. сделать отверстия или надрезы. Для этого предлагается [5] размещать часть поджигающих зарядов на поверхности льда, причем масса отдельного заряда m в тротиловом эквиваленте (кг) должна быть такой, чтобы ударной волной от его взрыва не повредить конструкцию.

Пик давления в ближней зоне ударной волны и в воздухе и во льду описывается приблизительно одинаковой зависимостью [6]:

$$P^* \cong m/R^3 \text{ (МПа)}, \quad (1)$$

где R – расстояние пробега волны (м).

Поэтому условием фрагментации «шубы» будет: $\sigma_k \geq P^* \geq \sigma_{ice}$, $R = h$, т.е. $\sigma_k h^3 > m \geq \sigma_{ice} h^3$, где σ_{ice} – прочность адгезии льда (МПа), σ_k – предельно допустимое давление на элементы конструкции сооружения (МПа), h – средняя толщина наледей (м), при размещении поджигающих зарядов массой m во льду с объемной плотностью распределения $n = \alpha T_f/m$ (шт/м³) в области распыления заряда ТВС, где T_f – температура воспламенения ТВС, α – расчетный коэффициент воспламенения ТВС воздушной ударной волной.

Взрыв ТВС необходимо осуществить одновременно во всем ее объеме, так как только в этом случае достигается максимальный эффект отрыва фрагментированной наледи волной разряжения на стадии полного выгорания ТВС. Для этого необходимо поддерживать детонационный режим возгорания ТВС по мере распространения ударной волны от инициирующих зарядов. Этого можно добиться, разместив поджигающие заряды избранной малой массы m по объему V распыленного облака ТВС с равномерной плотностью распределения (с расстоянием r между поджигающими зарядами) в количестве

$$N = V/r^3 \quad (2)$$

так, чтобы температура воздуха на фронте инициирующей ударной волны во всех точках заряда ТВС (T_f) была не меньше температуры воспламенения топлива (T), т.е. $T_f \geq T$.

Температура воздуха на фронте инициирующей ударной волны зависит от давления в этой волне $P^*(R)$ [8]:

$$\frac{P^*}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T_f} = k, \quad (3)$$

где k табулировано [8] для: P_0 – атмосферное давление (0,1 МПа), $T_0 = 288$ °К.

Принимая $R = r/2$ и производя соответствующие подстановки, получим:

$$n = \frac{N}{V} = \frac{1}{r^3} = \frac{1}{8R^3} = \frac{kT_f P_0}{8mT_0}, \quad (4)$$

так как из (1) и (3) $R^3 = \frac{m}{P^*} = \frac{mT_0}{kT_f P_0}$.

Тогда, учитывая, что $n = \alpha T_f/m$, из (4) значение коэффициента воспламенения ТВС будет

$$\alpha = \frac{kP_0}{8T_0} = 4,34 \cdot 10^{-5} k. \quad (5)$$

Пример расчета

Выбираем в качестве топлива керосин. Температура воспламенения паров керосина в воздухе $T_f = 508 \div 538$ °К. По таблице параметров ударной волны в воздухе [8] для температуры T_f находим: $k \approx 3$ при давлении $P^* \approx 0,5$ МПа. Рассчитываем значение плотности распределения поджигающих зарядов

$$n = \frac{4,34 \cdot 10^{-5} k T_f}{m} = \frac{0,066 \div 0,07}{m}. \quad (6)$$

Рассмотрим случай обледенения с параметрами: $\sigma_{ice} = 0,5$ МПа, $h = 0,1$ м. Для фрагментации ледовой «шубы» масса отдельного поджигающего заряда, расположенного на поверхности, должна быть: $m \geq \sigma_{ice} h^3 = 0,5 \cdot 10^{-3}$ кг. Следовательно, $n \leq 120 \div 130$ шт/м³.

Предположим, что предельно допустимое воздействие ударной волны на конструкцию определяется допустимыми напряжениями на срез для сварных швов: $\sigma_k \approx 7$ кг/мм² (70 МПа). Тогда максимально допустимая масса поджигающего заряда будет равна $m \leq \sigma_k h^3 = 70 \cdot 10^{-3} = 0,7$ кг, а плотность распределения поджигающих зарядов составит $n \approx 0,1$ шт/м³. Рамочное условие $\sigma_k h^3 > m \geq \sigma_{ice} h^3$ гарантирует фрагментацию наледи и взрыв ТВС в режиме догорания за фронтом инициирующей ударной волны. Если исходить из возможности использования стандартных упаковок тротила, например, применять шашки массой $m = 0,1$ кг, то безопас-

ность сварных швов будет гарантирована, а плотность распределения шашек не превысит значения $n \approx 1$ шт/м³.

Для осуществления одновременности подрыва ТВС поджигающие заряды включают в цепь электроподрыва по возможности без замедления в цепи, т.е. параллельным включением. Практически в качестве поджигающего заряда удобно применять детонационный шнур, прилегающий к поверхности наледи.

Необходимая масса топлива выбирается из расчета полного ее выгорания в воздухе при сохранении стехиометрической концентрации в облаке заряда ТВС. Так как масса кислорода в воздухе составляет 23 %, то массу топлива желательно выбрать не менее определяемой уравнением

$$M = 0,23spN/n, \quad (7)$$

где s – стехиометрическая концентрация топлива, ρ – плотность воздуха на месте проведения работ, N – количество размещенных поджигающих зарядов.

На основании ранжирования дистанций безопасности по давлению ударной волны от взрыва выбранной смеси, определяемой соотношением [8]:

$$P^* \approx (qM)^{1/3}/R, \quad (8)$$

где q – тротильный эквивалент теплоты сгорания топлива, проводятся предохранительные мероприятия с чувствительным оборудованием и живыми организмами. При этом для ранжирования используют критерии разрушения сооружений и материалов и критерии поражения живых организмов [2]. После этого можно распылять топливо в намеченном поджигающими зарядами объеме обледеневшего сооружения. Подача и распыление топлива осуществляется устройством, в состав которого входят пульверизаторы, компрессор и шланги-воздухопроводы. Компрессор находится за чертой безопасности, а пульверизаторы с топливом – в зоне предполагаемого распыления. Пульверизаторы запускаются в работу одновременно от одного компрессора.

При визуальном наблюдении расширения капельно-воздушного облака ТВС замыкают цепь электроподрыва в момент перекрытия облаком совокупности поджигающих зарядов. Для осуществления визуального наблюдения за облаком ТВС с дистанции безопасности в состав топлива включают краситель, который поможет определить нештатную ситуацию, например, в связи с действием ветра, и вовремя отказать от взрыва ТВС. Для усиления энергетика взрыва в качестве красителя полезно использовать термит (смесь порошка алюминия с окислами железа).

Следует отметить, что в экологическом отношении эпизод взрыва ТВС не более опасен, чем работа двигателя внутреннего сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов В.В. Обледенение тел в водновоздушных потоках: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Л.: Фонды ААНИИ, 1982. 198 с.
2. Баткер У. и др. Взрывные явления. Оценка и последствия / Пер. с англ. Кн. 1, 2. М.: Мир, 1986. 542 с.
3. Воронцов В.Р. и др. Разрушение ледяного покрова газовым взрывом // Труды МГТУ. 1992. № 557. С. 41–43.
4. Дмитриев В. Боеприпасы объемного взрыва // Зарубежное военное обозрение. 1984. № 9. С. 48–53.
5. Лебедев Г.А., Трипольников В.П. Способ очистки сооружений от наледей // Патент № 2318179. Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 27 февраля 2008 г. Приоритет изобретения 2 мая 2006 г.
6. 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. СПб., 2005. С. 480–483.

7. Панов В.В., Панюшкин А.В., Шванштейн З.И. Экспериментальное изучение адгезии льда в лабораторных и натуральных условиях // Труды ААНИИ. 1975. Т. 326. С. 147–154.
8. Физика взрыва / Под ред. Л.П.Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 1. 823 с.

G.A.LEBEDEV, V.P.TRIPOLNIKOV

DEVELOPMENT OF THE MODE AND TECHNOLOGICAL METHODS OF DESTRUCTION OF THE ATMOSPHERIC ICING WITH EXPLOSIONS

There are presented the results of development of the new mode of de-icing of the engineering structures using the explosion of the fuel and air mixture (FAM) and with observance of rules of the safe application of the technique offered. The physical and technological methods are reviewed. There is given the example of estimate of the required density of distribution of the ignitor charges and their mass as well as the required mass of fuel, in case of its complete burnout in the air, provided the stoichiometric concentration in the FAM charge cloud is preserved, for welded structure de-icing.

Key words: the mode, the technological methods, the destruction, the atmospheric icing, the explosion, the fuel and air mixture.