

## ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

---

---

УДК 539.3

А.Н. Прокудин, В.И. Одинок

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ НОВОГО СПОСОБА ЛИКВИДАЦИИ ЗАТОРООБРАЗОВАНИЙ НА РЕКАХ

Институт машиноведения и металлургии дальневосточного отделения РАН

Рассматривается новый способ разрушения ледяных заторов на реках, основанный на динамическом воздействии цилиндрического тела на нижнюю поверхность ледяного покрова в результате взрыва газозвушной смеси. Возможности способа ликвидации ледяных заторов исследуются с помощью построенной на основе фундаментальных уравнений механики сплошных сред математической модели и апробированного численного метода.

*Ключевые слова:* ликвидация ледяных заторов, математическое моделирование, напряженно-деформированное состояние, динамическое воздействие.

#### Введение

На многих реках северного полушария, текущих с юга на север, во время весеннего ледохода часто образуются ледяные заторы – скопления льда в русле реки. Ледяные заторы вызывают уменьшение живого сечения реки и приводят к повышению уровня воды в месте возникновения и в некотором районе выше него, что может привести к наводнениям. Наиболее негативными последствиями ледяных заторов являются: наводнения, повреждение гидротехнических сооружений и речных судов [1]. Для ликвидации ледяных заторов в настоящее время чаще всего применяется взрывной метод [2, 3], при котором либо на определенной глубине подо льдом, либо внутри затора подрываются заряды взрывчатого вещества. Недостатками взрывного метода являются высокие энергетические затраты, необходимость обеспечения безопасности людей, устанавливающих заряды взрывчатого вещества, вред, наносимый экологии водоема.

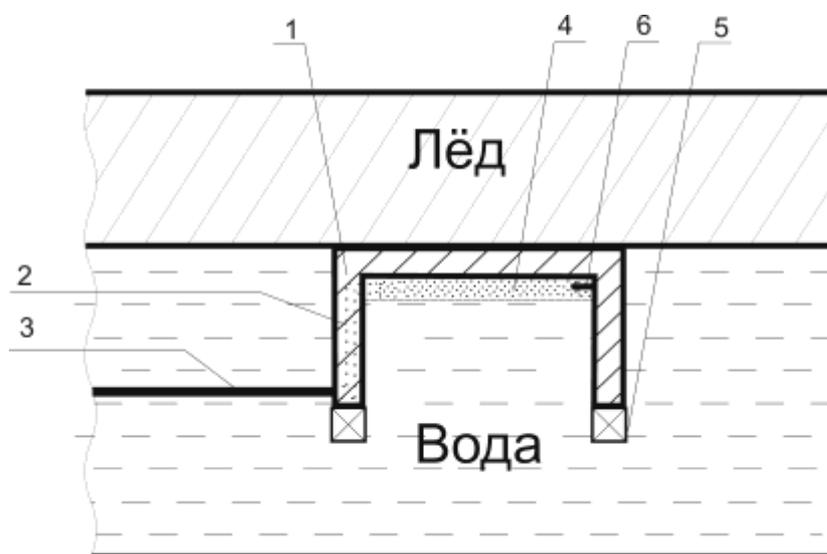
В работе рассматривается новый способ разрушения ледяных заторов, основанный на использовании энергии взрыва газозвушной смеси. Способ заключается в следующем: под лед или его нагромождение заводится устройство (рис. 1), состоящее из цилиндра 1, направленного дном в сторону нижней поверхности льда, имеющего каналы 2, по которым проходит гибкая система 3. По ней в область 4 подается газозвушная смесь. Маневренность конструкции осуществляется системой двигателей и механизмов 5.

Управление устройством осуществляется с передвижной станции, находящейся на берегу или на судне, по гибкой системе 3, включающей газовый шланг и электропровод.

Ликвидация ледяного затора с помощью данного устройства осуществляется следующим образом.

Устройство с помощью установленных на нем видеокамер и двигательных средств заводится под образовавшийся ледяной затор.

Далее со станции по гибкой системе 3 поступает определенный объем воздушно-газовой смеси, вытесняющий воду из пространства под стаканом 1, образуя газоздушную подушку 4. В качестве газозвушной смеси может использоваться, например, природный газ. Затем по этой же системе 3 подается искровой разряд в свечи 6. Происходит взрыв газозвушной смеси. В результате взрыва цилиндр устремляется вверх, ломая локальную область ледяного затора. После взрыва газ выходит через многочисленные отверстия в боковой стенке цилиндра 1, устройство приходит в исходное состояние и перемещается подо льдом в новое место.



**Рис. 1. Устройство для ликвидации ледяных заторов:**  
1 – цилиндр; 2 – канал; 3 – гибкая система; 4 – газозвушная система;  
5 – двигатели; 6 – свечи

Следует отметить, что природный газ значительно дешевле эквивалентного по теплоте взрыва количества тротила, и, кроме того, взрыв природного газа не наносит такого вреда экологии водоёма, как взрыв тротила.

По данному способу ликвидации заторообразований на реках направлена заявка на получение патента РФ. Похожий способ ликвидации заторов [4], разработанный авторами, исследовался в работе [5].

Рассматриваемый способ ликвидации ледяных заторов исследовался с помощью математического моделирования и численных расчетов.

### 1. Математическая модель

На рис. 2 приведена формализованная расчетная схема процесса разрушения с использованием исследуемого способа.

Здесь область I – лед, на который воздействуют давления  $p_1, p_2$  которые могут изменяться как по величине, так и по координате  $x_2$ ,  $p_1 \geq p_{ат}$ ,  $p_2 \geq p_{ат}$ ,  $p_{ат}$  – атмосферное давление. Область II – это цилиндр; область III – вода, область IV – газ, занимающий пространство под стаканом. Периферийная область  $x_2 \geq R_2$  находится на значительном расстоянии от стакана II  $R_3 \gg R_2$ . Для простоты принималось, что устройство находится на дне акватории (рис. 2). Получаем трехкомпонентную модель I-III, находящуюся в динамическом взаимодействии в результате взрыва газозвушной смеси в области IV.

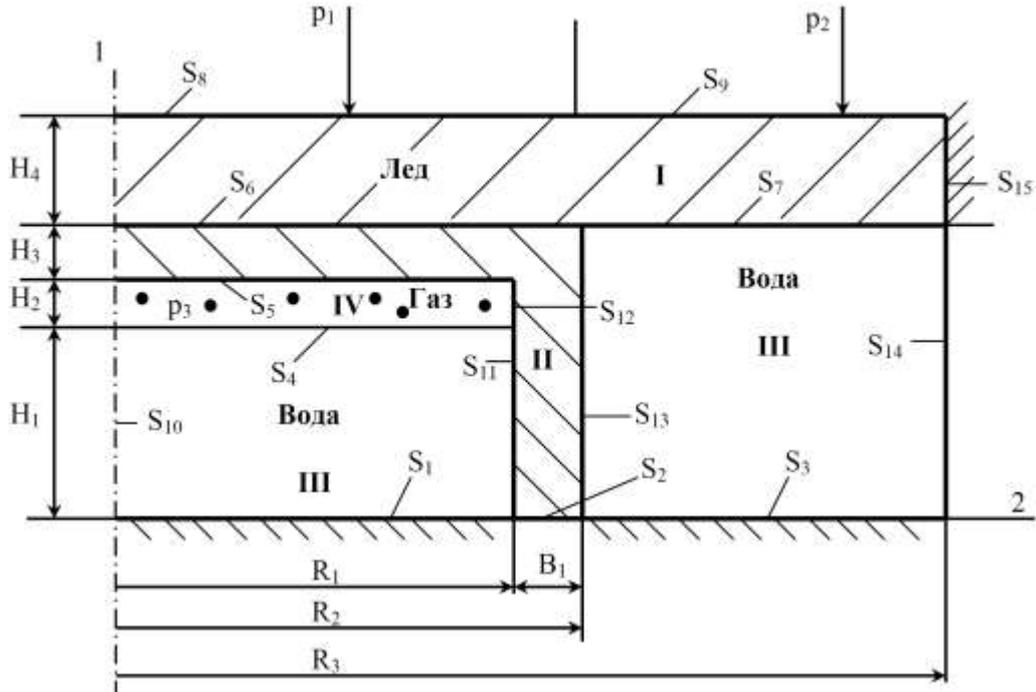


Рис. 2. Расчетная схема процесса

Ледяной затор и цилиндр (области I и II) принимались упругими, однородными, изотропными, несжимаемыми, а их деформации – малыми. Напряженно-деформированное состояние в этих областях описывалось уравнениями движения, законом Гука для малых деформаций и уравнением несжимаемости.

$$\sigma_{ij,j} + F_i^t = \rho_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial \tau} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad i, j, k = 1, 2, 3, \quad t = I, II; \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2(G)_t \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, 2, 3, \quad t = I, II; \quad (2)$$

$$v_{i,i} = 0, \quad (3)$$

в которых  $t$  - идентификатор области;  $[\sigma_{ij}]$  - тензор напряжений;  $F_i^t$  - проекция удельной объемной силы на координатные оси  $x_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\rho_t$  - плотность материала;  $v_i$  - проекция скоростей перемещений на координатные оси  $x_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ;  $\tau$  - время;  $\sigma$  - гидростатическое напряжение;  $\delta_{ij}$  - символ Кронекера;  $G_t$  - модуль сдвига в области  $t$ ;  $[\varepsilon_{ij}]$  - тензор деформаций; в уравнениях имеет место суммирование по повторяющимся индексам.

Для малых деформаций справедливо равенство  $\xi_{ij} = \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial \tau}$ , где  $\xi_{ij}$  - компоненты тензора скоростей деформаций сдвига.

Вода (область III) считалась ньютоновской, вязкой, несжимаемой жидкостью. Для моделирования движения жидкости использовались уравнения Навье-Стокса и уравнение несжимаемости:

$$F_i^t - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \nabla^2 v_i = \rho_t \left( \frac{\partial v_i}{\partial \tau} + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad i, k = 1, 2, 3, \quad t = III; \quad (4)$$

$$v_{i,i} = 0, \quad (5)$$

в которых  $p$  - давление;  $\mu$  - коэффициент динамической вязкости;  $\nabla^2$  - оператор Лапласа  $\rho_t$  - плотность в области  $t = III$ .

Газовоздушная подушка (область IV) моделировалась через давление  $p_3$ , создаваемое в результате горения газовоздушной смеси в замкнутом объеме. Время горения определялось через толщину газовоздушной подушки  $H_2$  и скорость горения  $v_r$  по формуле:

$$\tau_r = H_2 / v_r$$

Давление  $p_3$  и скорость горения  $v_r$  задавались с помощью экспериментальных данных [6].

Для удобного построения численной схемы и вычислительного алгоритма решения задачи, система уравнений (1-4) приводилась к единому виду для всех областей I-III

$$\begin{aligned} \sigma_{ij,j} + F_i^t &= \rho_t \left( \dot{v}_i + v_k \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \right), \quad t = I, II, III; \\ \sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} &= 2\lambda_t C_{ij}^t, \quad \begin{cases} \lambda_t = G_t; & C_{ij}^t = \varepsilon_{ij}; & t = I, II; \\ \lambda_t = \mu; & C_{ij}^t = \xi_{ij}; & t = III; \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

$$v_{i,i} = 0.$$

Соответствие системы (6) системе (4-5) нетрудно проверить, подставив уравнение  $\sigma_{ij} - \sigma \delta_{ij} = 2\mu \xi_{ij}$  в уравнения движения, с учетом уравнения несжимаемости (5), получим уравнение (4).

Граничные условия задачи ставились с учетом осевой симметрии (рис. 2):

$$\begin{aligned} \sigma_{11}|_{S_i} &= -p_3, \quad i = 4,5; \quad \sigma_{11}|_{S_8} = -p_1; \quad \sigma_{11}|_{S_9} = -p_2; \quad \sigma_{11}|_{S_2} = 0; \\ \sigma_{12}|_{S_i} &= 0, \quad i = 1, \dots, 9; \quad \sigma_{21}|_{S_i} = 0, \quad i = 11, \dots, 15; \quad \sigma_{22}|_{S_{12}} = -p_3; \quad \sigma_{21}|_{S_{15}} = -\psi \tau_s \frac{v_{ck}}{|v_u|}; \\ v_1|_{S_1} &= 0; \quad v_1|_{S_3} = 0; \quad v_2|_{S_i} = 0, \quad i = 10, 14, 15. \end{aligned} \quad (7)$$

Для решения сформулированной системы уравнений (6) с учетом граничных условий (7) использовался апробированный численный метод [7], который применяется при решении различных задач математического моделирования [8]. Согласно методу [7] область деформирования разбивается на ортогональные элементы конечных размеров, для каждого из которых записывается система (6) в конечно-разностном виде, которая решается по разработанному алгоритму с учетом граничных условий (7). Результатом решения являются поля напряжений и скоростей перемещений по граням каждого элемента.

## 2. Физико-механические параметры

Для задания физико-механических параметров льда использовались данные [9] для пресноводного льда: модуль упругости  $G_1 = 29.2 \cdot 10^3$  кг/см<sup>2</sup>, удельный вес  $\gamma_1 = 920$  кг/м<sup>3</sup>.

В качестве материала цилиндра принимали сталь Ст.3, для которой модуль упругости  $G_2 = 8 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>, удельный вес  $\gamma_2 = 7800$  кг/м<sup>3</sup> [10].

Коэффициент динамической вязкости воды по данным [11]  $\mu = 0.01789$  г/(см·с). Удельный вес воды  $\gamma_3 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>.

Давления, действующие на лёд:  $p_1 = 1$  атм,  $p_2 = 1,5$  атм.

В качестве газовоздушной смеси принимался природный газ (9,9% метана), для которого давление  $p_3 = 7$  атм, а скорость горения  $V_r \cong 0,67$  м/с.

В качестве критерия разрушения использовался критерий наибольших нормальных напряжений, согласно которому разрушение в материале наступает при достижении нормальных напряжений некоторого критического значения  $\sigma_k$ . Для льда критическое значение напряжений по данным [9]  $\sigma_p = 1.5$  МПа при растяжении и  $\sigma_c = 2.5$  МПа при сжатии.

### 3. Результаты численных расчетов

Начальные геометрические параметры задачи (рис. 2) варьировались следующим образом: радиус цилиндра  $R_1 = 3$  м, 3.5 м, 4 м. Толщина льда  $H_4$ : 2 м, 2.5 м, 3 м. Толщина газовой подушки  $H_2$ : 0.03 м, 0.04 м, 0.05 м, 0.06 м,

Радиус расчетной области принимался равным  $R_3 = 20$  м, толщина стенок цилиндра  $B_1 = H_3 = 0.1$  м, высота цилиндра  $H_1 = 1$  м.

Результаты численных расчетов показали, что в результате взрыва цилиндр устремляется вверх со скоростью в центральной части ( $R \approx 0$ ) выше, чем в периферийной ( $R \approx R_1$ ). Это приводит к тому, что в верхних слоях ледяного покрова действуют растягивающие напряжения  $\sigma_{22}$ , а в нижних – сжимающие  $\sigma_{22}$ .

Значения радиуса области разрушения (табл. 1, 2, 3) определены, исходя из принятого критерия, в зависимости от толщины газовой подушки и льда при радиусе цилиндра  $R_1 = 3$  м, 3.5 м, 4 м, соответственно. В указанном радиусе ледяной покров разрушается по всей толщине, при этом вследствие близости напряжений  $\sigma_{22}$  и  $\sigma_{33}$  разрушение происходит как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях.

Таблица 1

**Зависимость радиуса области разрушения от толщины льда и газовой подушки при  $R_1 = 3$  м**

Толщина льда $H_4$ , м	Толщина газовой подушки $H_2$ , м	Радиус области разрушения, м
2	0.03	1.8
2	0.04	2.1
2	0.05	2.3
2	0.06	3

Отметим, что при радиусе цилиндра  $R_1 = 3$  м. и толщине газовой подушки  $H_2$  от 0.03 до 0.06 м. разрушения во льду толщиной 2.5 м и выше не происходит.

Таблица 2

**Зависимость радиуса области разрушения от толщины льда и газовой подушки при  $R_1 = 3.5$  м**

Толщина льда $H_4$ , м.	Толщина газовой подушки $H_2$ , м	Радиус области разрушения, м
2	0.03	2.5
2	0.04	3.5
2	0.05	3.5
2	0.06	3.5
2.5	0.03	1.6
2.5	0.04	1.9
2.5	0.05	2.2
2.5	0.06	2.3
3	0.03	0
3	0.04	0
3	0.05	0.1
3	0.06	1.0

Таблица 3

**Зависимость радиуса области разрушения от толщины льда  
и газовой подушки при  $R_1 = 4$  м**

Толщина льда $H_4$ , м	Толщина газовой подушки $H_2$ , м	Радиус области разрушения, м
2	0.03	4
2	0.04	4
2	0.05	4
2	0.06	4
2.5	0.03	2.5
2.5	0.04	2.7
2.5	0.05	2.8
2.5	0.06	3.0
3	0.03	1.5
3	0.04	2.0
3	0.05	2.5
3	0.06	2.7

Напряжения, возникающие в ходе процесса разрушения в цилиндре, не превышают предел текучести  $\tau_s$  для стали Ст.3, который по данным [10] составляет 300 МПа.

Результаты численных расчетов также показали, что конструкция устройства может быть существенно облегчена за счет уменьшения толщины стенок цилиндра до 0.075 м и 0.05 м. При этом напряжения в цилиндре значительно возрастают, но все равно остаются далекими от предела текучести  $\tau_s$ , а напряженно-деформированное состояние в ледяном покрове, как и радиус области разрушения, практически не меняется. Помимо этого, вес конструкции можно снизить путем уменьшения высоты цилиндра до 0.75 м и 0.5 м. В данном случае наблюдается незначительный рост напряжений в цилиндре, а также небольшое снижение радиуса области разрушения льда.

Увеличение радиуса расчетной области  $R_3$  до ста метров и выше практически не сказывается на напряженно-деформированном состоянии льда и цилиндра.

#### Библиографический список

1. **Beltaos, S.** (Editor) River ice jams / S. Beltaos. – Water Resources Publications. Littleton. Colorado. 1995. – 372 p.
2. Справочник по буровзрывным работам / М.Ф. Друкованый [и др.]. – М.: Недра, 1976. – 631 с.
3. **Матвейчук, В.В.** Взрывные работы: учеб. пособие / В.В. Матвейчук, В. П. Чурсалов. – М.: Академический проспект, 2002. – 384 с.
4. **Пат. №2356777.** Способ ликвидации заторообразований / Одинокоев В.И., Сергеева А.М. Бюл. №15 от 27.09.2009.
5. **Одинокоев, В.И.** Моделирование процесса разрушения ледяных заторов / В.И. Одинокоев, А.Н. Прокудин // Прикладная механика и техническая физика. 2010. Т. 51. №1. С. 110-116
6. **Равич, М. Б.** Беспламенное поверхностное горение / М. Б. Равич. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1949. – 354 с.
7. **Одинокоев, В.И.** Численное исследование процесса деформации материалов бескоординатным методом / В.И. Одинокоев. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 354 с.
8. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В.И. Одинокоев [и др.]. – М.: Наука, 2008. – 176 с.
9. **Богородский, В.В.** Лед. Физические свойства. Современные методы гляциологии / В.В. Богородский, В. П. Гаврило. – Л.: Гидрометеоздат, 1980. – 384 с.

10. **Кроха, В.А.** Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник / В.А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 157 с.
11. **Кикоин, И.К.** Таблицы физических величин: справочник / И.К. Кикоин. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

*Дата поступления  
в редакцию 06.07.2010*

**A.N. Prokudin, V.I. Odinokov**

## **INVESTIGATION OF POSSIBILITIES OF NEW ICE JAMS REMOVING METHOD**

The new method of river ice jams removing based on dynamic impact of cylindrical body to the bottom surface of ice cover in the issue of exploding of the air-gas mixture is considered. Possibilities of removing method are investigated by help of mathematical model which built on basis of fundamental equations of continuum mechanics and well-tested numerical method.

*Key words:* removing of ice jams, mathematical modeling, deflected mode, dynamic impact.