

УДК 629.12.011:624.046

В.В. Князьков

## ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ И ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается деформирование ледяного покрова от действия поперечной нагрузки. Решается задача изгиба тонкой пластины малого прогиба для случая, когда под частью поверхности пластины отсутствует упругое основание из-за наличия воздушной полости.

*Ключевые слова:* ледяной покров, судно на воздушной подушке, разрушение, метод конечных элементов.

Для стабилизации положения на внутренних водных путях и сохранения существующей воднотранспортной сети<sup>\*</sup> в 1996 г. была принята Федеральная целевая программа (ФЦП) "Внутренние водные пути России", которой Указом Президента Российской Федерации придан статус президентской. Постановлением правительства Российской Федерации от 5 декабря 2001 г. № 848 утверждена ФЦП "Модернизация транспортной системы России" [1].

Продление навигации на внутренних водных путях по-прежнему является важной народно-хозяйственной проблемой, актуальность решения которой возрастает в связи с переходом речных пароходств к новым условиям хозяйствования. Под продлением навигации понимают осуществление комплекса мероприятий, которые обеспечивают судоходство за пределами физической навигации.<sup>\*\*</sup> К основным мероприятиям текущего характера, согласно ФЦП, относится увеличение продолжительности навигации на единой глубоководной системе Европейской части России на 10–15 суток. Увеличение продолжительности навигации на одни сутки позволит перевести дополнительно более 300 тыс. т груза в сутки и получить дополнительные доходы в объеме около 25–30 млн руб. Экономия затрат в результате продления навигации достигается, как путем освоения дополнительных объемов перевозок грузов, которые передаются с других видов транспорта, в первую очередь с железнодорожного, так и путем выполнения того же объема перевозок меньшим числом судов. Работа ледокольных средств позволяет увеличить продолжительность навигации путем искусственного вскрытия и очищения водных путей ото льда. Объем ледокольных работ и сроки их выполнения зависят от гидрометеорологических условий, которые складываются в каждый период навигации. Повышение объемов и эффективности перевозок в физическую навигацию во многом определяется и своевременной расстановкой флота в ранневесенний и позднеосенний периоды. Причем в современных условиях, когда пополнение флота потеряло плановый характер, объемы постройки новых судов крайне ограничены, и перевозчики грузов водным путем вынуждены решать транспортные задачи имеющимися в их распоряжении средствами, происходит и своеобразная переоценка значимости характеристик ледокольных и транспортных средств.

Принципиально новым средством разрушения ледяного покрова и повышения эффективности ледоколов стало использование судов на воздушной подушке. Опыт эксплуатации ледокольных судов на воздушной подушке (ЛСВП), построенных в нашей стране и за рубежом, показывает, что данный способ борьбы с ледовыми затруднениями имеет большие преимущества и перспективы [2, 3].

© Князьков В.В., 2012.

<sup>\*</sup>С 1991 г. произошло значительное сокращение объема перевозок и финансирования содержания внутренних водных путей.

<sup>\*\*</sup>Физическая навигация – это период судоходства по свободной ото льда воде на определенном участке пути.

Во время экспериментальных исследований разрушения льда судами на воздушной подушке способом давления отмечалось (рис. 1), что разрушение ледяного покрова может происходить как при наличии воздушной полости, так и при ее отсутствии. В первом случае при вполне определенных размерах воздушной полости лед разрушается под действием собственной тяжести. Когда полость не образуется, то его разрушение происходит от изгиба ледяного покрова при действии на него давлений в воздушной подушке. Решение задачи об изгибе ледяной пластины позволяет установить связь между давлением, размерами воздушной подушки и толщиной льда.



Рис. 1. Испытание состава: ледокол "Ока"+ЛПВП-107П на Волге

В режиме парения над водой под корпусом судна на воздушной подушке образуется впадина, глубина которой равна

$$h_{\text{вп}} = \frac{p_{\text{вп}}}{\rho_{\text{в}} g}, \quad (1)$$

где  $p_{\text{вп}}$  – давление в воздушной подушке;  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения.

При движении ЛСВП на ледяной покров воздушная полость заходит под лед и распространяется под ним. Эта полость устраняет реакцию упругого основания (воды) и равновесие ледяного покрова достигается лишь силами упругости. Считается, что воздух из воздушной подушки ЛСВП при его движении на кромку льда начинает распространяться под ним в виде полости, если выполняется следующее условие:

$$h_{\text{вп}} > \frac{\rho_{\text{л}} h_{\text{л}} + \rho_{\text{сн}} h_{\text{сн}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где  $h_{\text{л}}$ ,  $h_{\text{сн}}$  – толщина льда и слоя снега на нем;  $\rho_{\text{л}}$ ,  $\rho_{\text{сн}}$  – плотность льда и снега. При этом постоянное существование такой полости возможно тогда, когда линия, на которой прогибы нижней поверхности ледяного покрова равны глубине впадины, не выходят за ширину воздушной подушки в процессе разрушения [4].

Проанализируем статический изгиб ледяного покрова. Модель ледяного покрова примем в виде тонкой полубесконечной изотропной пластины постоянной толщины, лежащей на упругом основании винклеровского типа. Нагрузку от ЛСВП представим как систему распределенных по площади воздушной подушки давлений.

Следует отметить, что на механизм деформации льда от поперечной нагрузки специалисты смотрят по-разному: одни считают, что ко льду применима классическая теория изги-

ба, по существу пренебрегающая поперечными сдвигами; другие же, наоборот, полагают, что в силу специфических свойств льда как материала поперечные сдвиги играют важную, возможно, даже преобладающую роль в его деформации. Результаты исследований, полученные в [5], свидетельствуют о том, что при размерах ледяного покрова, которые характерны для случая его разрушения при создании судоходного канала, поперечные сдвиги не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на величину прогибов ледяного покрова и возникающих в нем внутренних моментов и напряжений даже при очень медленном нагружении.

Поставленную задачу будем решать методом конечных элементов (МКЭ). Разновидности МКЭ (*методы перемещений и сил*), взаимно дополняющие друг друга, приводят к тому, что МКЭ в варианте метода перемещений более точно определяет конфигурацию деформируемого тела, а МКЭ в варианте метода сил точнее характеризует его напряженно-деформированное состояние (НДС). Стремление к точному расчету изменений геометрии конструкции, исходя из перемещений ее узлов и параметров ее НДС, привело к тому, что вместо "чистокровных" моделей МКЭ в вариантах методов перемещений и сил были получены смешанные конечные элементы. Смешанные модели обеспечивает функционал Хеллингера-Рейсснера  $\Pi_{HR}^{(e)}$ . Данный функционал является двухполевым по своей внутренней природе, одновременно включающим поля перемещений и напряжений в пределах всего элемента, поэтому такие смешанные модели легче удовлетворяют требованиям совместности на границе смежных элементов. При этом не требуется численного дифференцирования перемещений для определения изгибающих моментов, так как последние входят в вектор обобщенных координат элемента. Вектор обобщенных координат треугольного элемента (рис. 2) содержит прогибы  $w_i$  вершин треугольника и нормальные изгибающие моменты  $M_{ni}$  на серединах его сторон [6]:

$$\{q\}^{(e)} = \{w_1, w_2, w_3, M_{n1}, M_{n2}, M_{n3}\}. \tag{3}$$

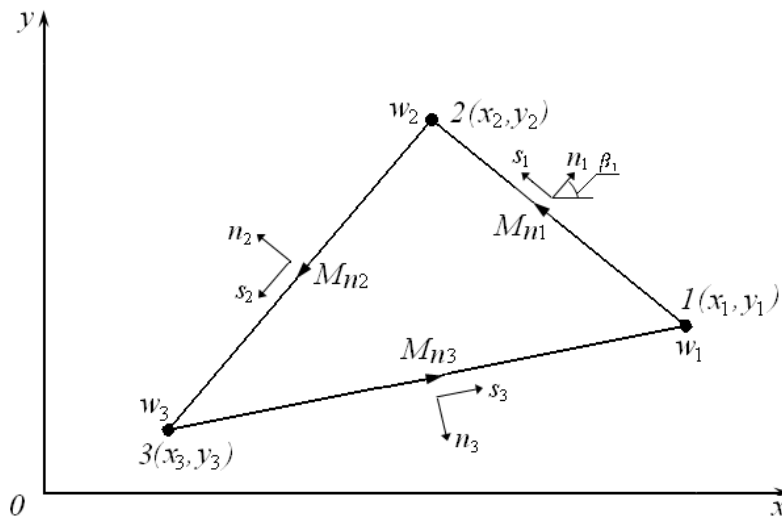


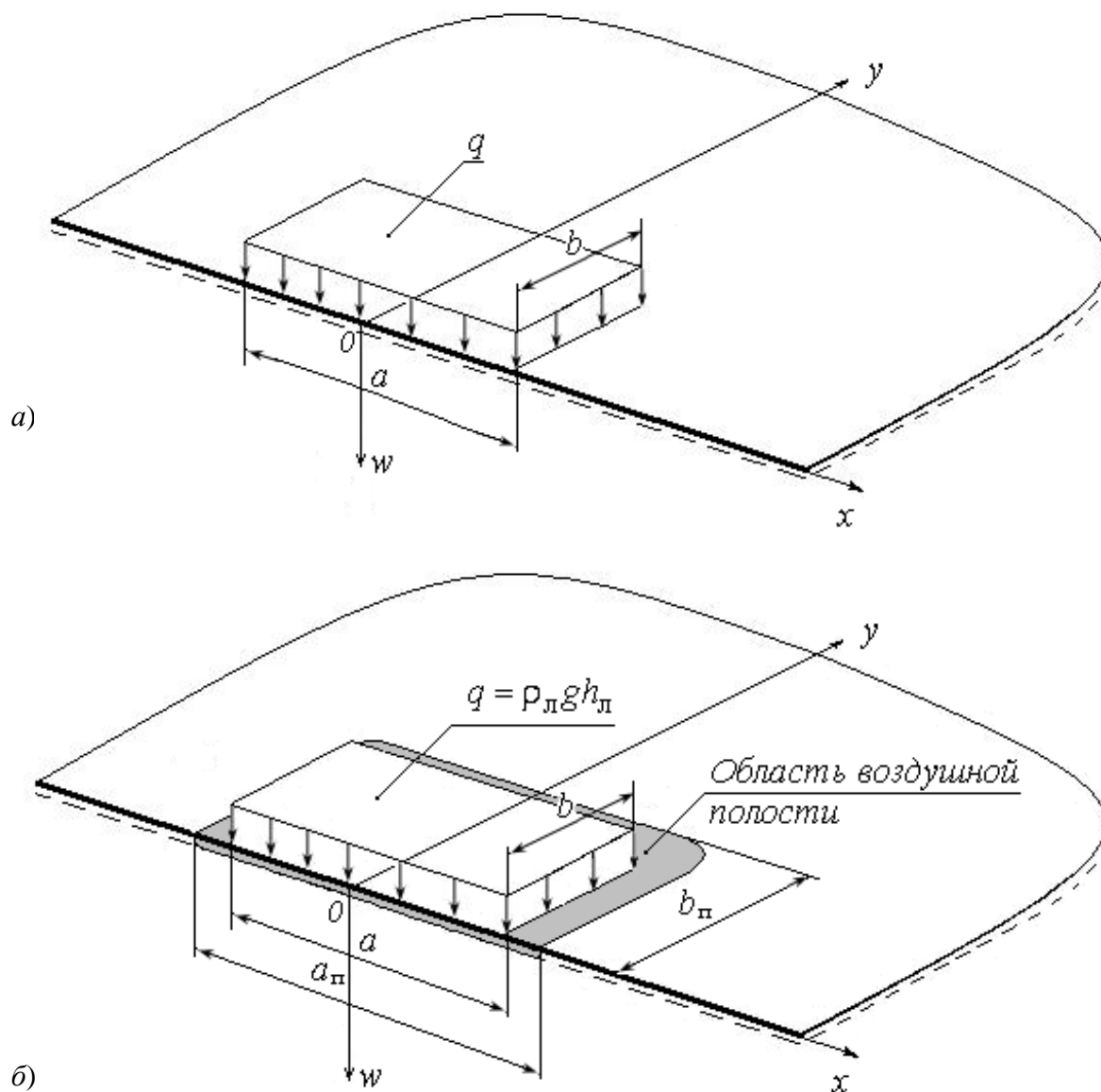
Рис. 2. Треугольный элемент смешанного типа

Функционал Хеллингера-Рейсснера с учетом упругого основания имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi_{HR}^{(e)} = & \iint_{A^{(e)}} \{ (M_{x,x} + M_{xy,y})w_{,x} + (M_{y,y} + M_{xy,x})w_{,y} - \frac{12}{Eh^3} [(1 + \mu)M_{xy}^2 + \frac{1}{2}(M_x^2 + M_y^2) - \\ & \mu M_x M_y] + \frac{1}{2}kw^2 - qw \} dx dy - \oint_{S_1^{(e)}} w_s M_{ns} dS - \oint_{S_2^{(e)}} w \bar{V}_n dS - \oint_{S_3^{(e)}} \bar{w}_{,n} M_n dS, \end{aligned} \tag{4}$$

в котором  $A^{(e)}$  – площадь элемента;  $h$  – толщина пластины;  $k = \rho_b g$  – коэффициент постели;  $q$  – нормальное давление;  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона; нижние индексы после запятой означают производные.

Исследуем два случая. В первом – упругое основание под ледяным покровом будем считать непрерывным, а во втором – имеется воздушная полость переменных размеров, давление в которой равно давлению в воздушной подушке. Расчетные схемы приведены на рис. 3; сеточная аппроксимация на рис. 4.



**Рис. 3. Расчетные схемы:**  
 $a$  – полость отсутствует;  $b$  – наличие полости

В случае распространения воздушной полости подо льдом в зависимости от ее размеров меняется характер нагружения ледяного покрова:

$$- a_n < a \text{ и } b_n < b.$$

В области  $2x < a_n$  и  $y < b_n$  давление на лед сверху и снизу одинаково и равно давлению в воздушной подушке. Силы поддержания отсутствуют, и лед находится под действием сил тяжести.

В области  $a_n < 2x < a$  и  $b_n < y < b$ , где нет воздушной полости, на лед действует давление, равное давлению в воздушной подушке:

$$- a_{\Pi} = a \text{ и } b_{\Pi} = b.$$

В пределах всей области  $2x \leq a_{\Pi}$  и  $y \leq b_{\Pi}$  давление на лед сверху и снизу одинаково и равно давлению в воздушной подушке. Лед находится под действием сил тяжести:

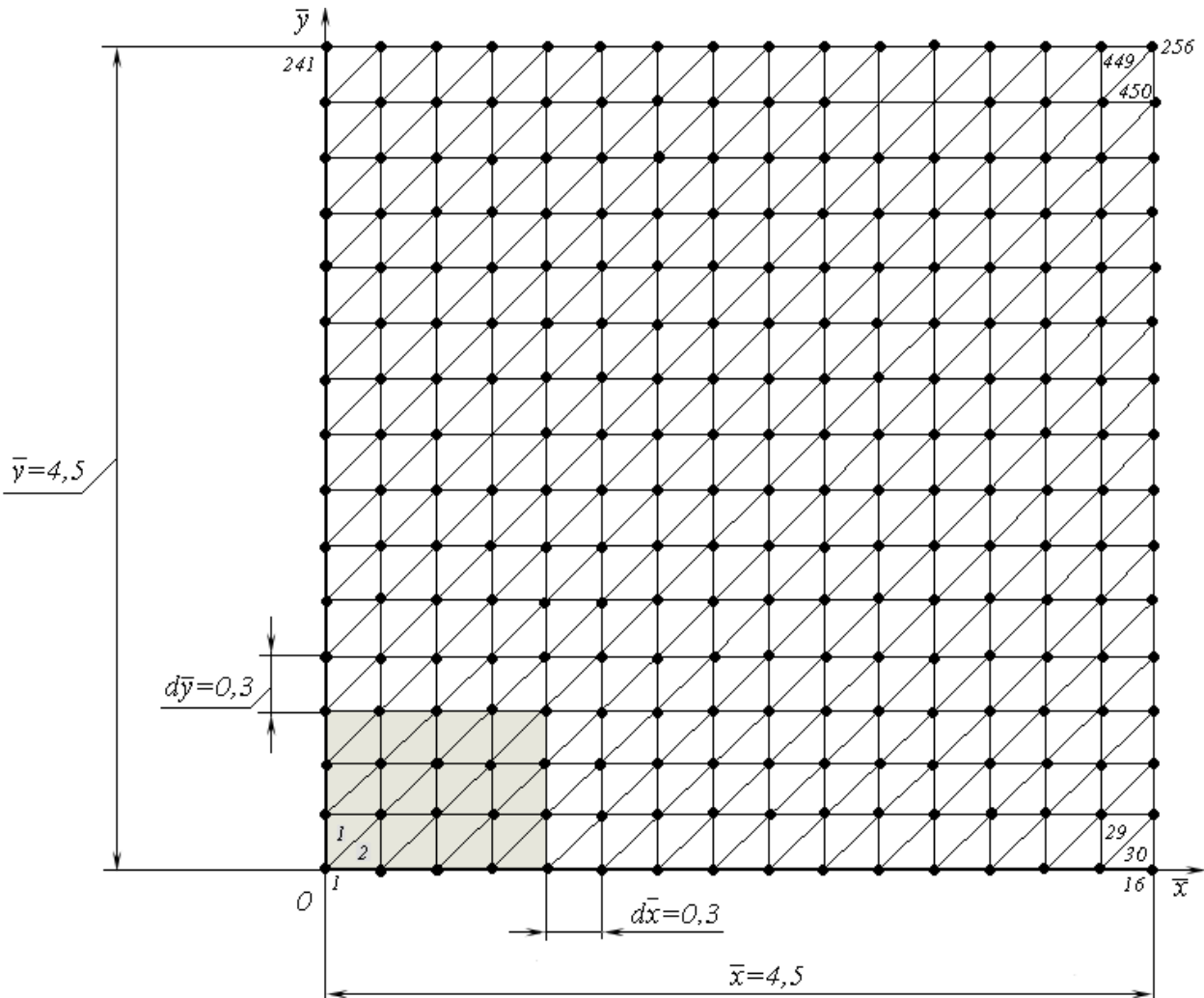
$$- a_{\Pi} > a \text{ и } b_{\Pi} > b.$$

В этом случае в зоне воздушной полости при  $a < 2x \leq a_{\Pi}$  и  $b < y < b_{\Pi}$  создается подпор с давлением, равным давлению в воздушной подушке, т.е. на ледяной покров действует давление  $\Delta q = p_{\text{вп}} - \rho_{\text{л}} g h_{\text{л}}$ , направленное вверх.

В результате решения были получены поля безразмерных прогибов  $w_i = w(x_i, y_i)$  и моментов  $M_{ni} = M(x_i, y_i)$ . Значения моментов использовались в дальнейшем для нахождения полей напряжений. За критерий прочности при изгибе ледяного покрова принята величина предельного растягивающего напряжения, действующего у верхней или нижней поверхности пластин:

$$\overline{M}_{\text{пред}} = \frac{\sigma_p h_{\text{л}}^2 \alpha^2}{6q}, \tag{5}$$

где  $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{D}}$  – параметр упругого основания;  $D$  – цилиндрическая жесткость ледяной пластины;  $\sigma_p$  – предел прочности на растяжение.



**Рис. 4. Сеточная аппроксимация расчетной области с учетом симметрии:**  
256 – число узлов; 450 – число элементов

Полученные решения позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Возникновение воздушной полости и распространение ее подо льдом за пределы действия давления ЛСВП приводит к увеличению изгибающего момента, что, в конечном итоге, равнозначно уменьшению площади действия  $q = \rho_{\text{л}} g h_{\text{л}}$ , т.е. размеров ЛСВП в плане (см. рис. 3, а, б). При этом наличие воздушной полости заметней сказывается для более тонкого льда ( $h_{\text{л}} \leq 0,5 \text{ м}$ ; рис. 5, б).

2. Влияние величины дополнительного подпора на элементы изгиба уменьшается с увеличением площади распределения давления от ЛСВП (рис. 6). Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  представляют собой отношения максимальных значений изгибающих моментов и прогибов при значениях  $\Delta \bar{q} = 0,10$  и  $\Delta \bar{q} = 0,15$  соответственно:

$$k_1 = \frac{\bar{M}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,10)}{\bar{M}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,15)}; \quad k_2 = \frac{\bar{w}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,10)}{\bar{w}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,15)}.$$

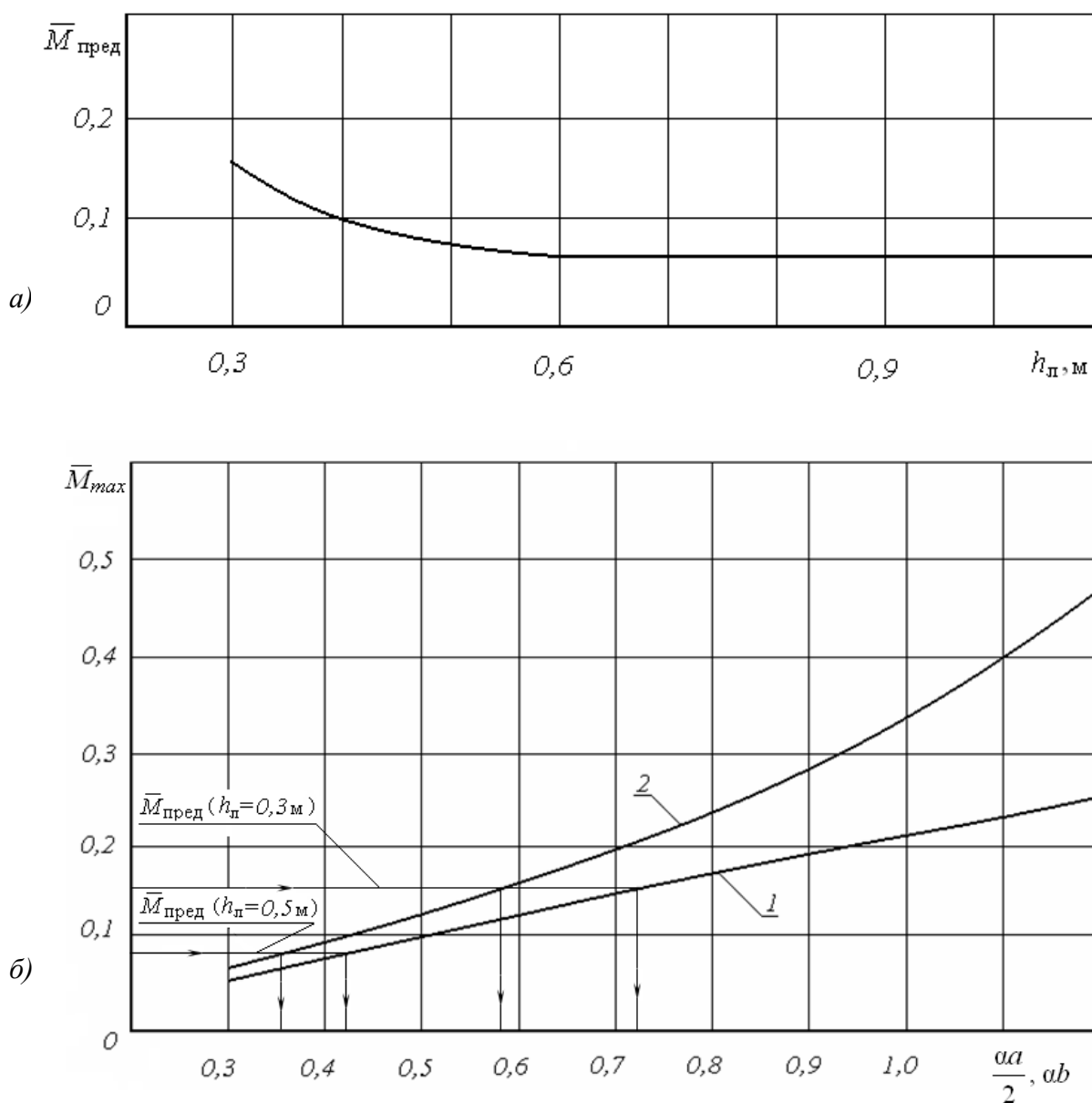
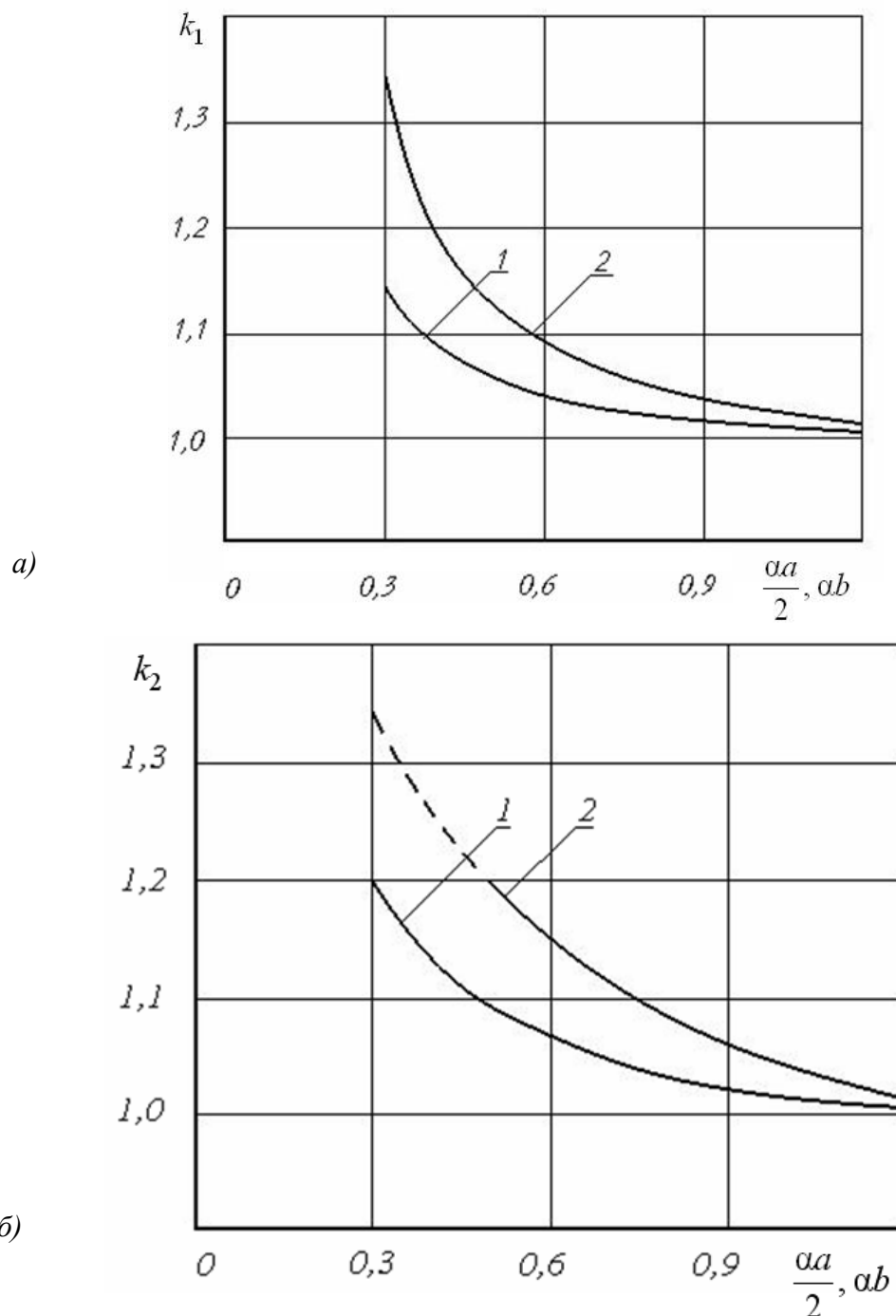


Рис. 5. Влияние воздушной полости на НДС ледяного покрова:  
 1 – полость отсутствует; 2 – наличие полости



**Рис. 6. Влияние давления в воздушной подушке на значение изгибающего момента (а) и прогиб ледяного покрова (б):**

$$1 \frac{\alpha a_{\text{п}}}{2} = \frac{\alpha a}{2} + 0,3 \quad ; \quad 2 \frac{\alpha a_{\text{п}}}{2} = \frac{\alpha a}{2} + 0,6$$

3. Значение размера зоны распределения нагрузки вдоль оси  $x$  при заданном значении вдоль оси  $y$ , определенное по следующей зависимости, соответствует оптимальному, т.е. минимальному, значению необходимого давления:

$$x_0^{\text{opt}} = 1,774 + 0,480y_0 - 0,111y_0^2, \tag{6}$$

где  $y_0 = \alpha b$ ,  $x_0 = \alpha a$ .

4. Зависимость, полученная для случая отсутствия воздушной полости, может слу-

жить нижней границей оценки величины давлений, необходимых для разрушения льда ЛСВП:

$$q \geq \bar{q} \sigma_p h_n^2 \alpha^2, \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{q} = 1,6 \left[ \left( 0,64 + \frac{0,57}{y_0} \right) - \left( 0,26 + \frac{0,16}{y_0} \right) x_0 + \left( 4,86 + \frac{4,88}{y_0} \right) 10^{-2} x_0^2 \right].$$

5. По графикам, приведенным на рис. 5, б, можно определить потребные размеры зоны нагружения ледяного покрова (нижняя граница площади воздушной подушки).

6. Полученные результаты согласуются с ранее полученными выводами для случая центрального нагружения [7].

#### Библиографический список

1. Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации: [[http://www.mintrans.ru/Pressa/Conception\\_Water\\_Trans.htm](http://www.mintrans.ru/Pressa/Conception_Water_Trans.htm)].
2. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
3. Зуев, В.А. Оценка эффективности ледокольных средств / В.А. Зуев, В.В. Князьков // Речной транспорт. 1997. № 4. С. 32–33.
4. Двойченко, Ю.А. Численная модель разрушения ледяного покрова при движении СВП с низкой скоростью // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горьков. политехн. ин-т. им. А.А. Жданова. Горький, 1984. С. 81–88.
5. Панфилов, Д.Ф. О механизме поперечного изгиба у льда // Журнал технической физики. 1979. Т. 49. № 10. С. 2121–2126.
6. Шахверди, Г.Г. Ударное взаимодействие судовых конструкций с жидкостью / Г.Г. Шахверди. – СПб.: Судостроение, 1993. – 256 с.
7. Князьков, В.В. Влияние воздушной полости на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горьков. политехн. ин-т. им. А.А. Жданова. Горький, 1984. С. 66–69.

Дата поступления  
в редакцию 22.06.2012

V. Knyazkov

#### EFFECT OF SIZE DISTRIBUTION OF LOAD AND THE AIR CAVITY ON THE STRESS-STRAIN STATE OF ICE COVER

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Extension of navigation on inland waterways is an important problem. A fundamentally new means of destruction of the ice cover and efficiency was the use of icebreakers icebreaking hovercraft. We analyze the static bending of the ice cover. The model adopted by the ice cover in the form of a thin semi-infinite isotropic plate of constant thickness, resting on an elastic foundation. This problem is solved by finite element method. The conclusions about the influence of air cavities of different configurations on the stress-strain state of the ice cover. The necessary size of the loading zone of the ice cover (lower boundary of the area of the air cushion).

*Key words:* ice cover, hovercraft, fracture, finite element method.