

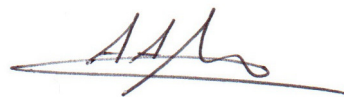
Матюшина Анна Александровна

**Колебания плавающей упругой
пластины при нестационарном воздействии на неё нагрузки**

01.02.04 — механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук



Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Амурском гуманитарно-педагогическом государственном университете (г. Комсомольск-на-Амуре) и Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Приамурском государственном университете им. Шолом-Алейхема (г. Биробиджан).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор, **Козин Виктор Михайлович** (г. Комсомольск-на-Амуре, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории механики деформирования)

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, **Стурова Изольда Викторовна** (г. Новосибирск, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории гидроаэроупругости)

кандидат физико-математических наук, **Иванова Юлия Евгеньевна** (г. Владивосток, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, научный сотрудник лаборатории нелинейной динамики деформирования)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород)

Защита состоится 31 мая 2018 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, просп. Ленина, д. 27, ауд. 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке КНАГУ и на сайте <https://knastu.ru>.

Автореферат разослан 18 апреля 2018 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
к.ф.-м.н., доцент



А.Л. Григорьева

Общая характеристика работы

Актуальность темы. В последние годы возрос интерес к освоению полярных районов с целью разработки нефте- и газоносных месторождений. В связи с этим возникает необходимость создания воздушной навигации в эти труднодоступные районы. Строительство аэродромов в данной местности весьма трудоёмко и требует значительных экономических затрат. Использование для этих целей ледяного покрова позволит сократить их объём. При этом возникает проблема определения влияния толщины ледяного покрова, глубины акватории, места расположения взлётно-посадочной полосы (ВПП) на характер волнообразования при использовании льда в качестве аэродромов, т.е. на его гарантированную (минимально-достаточную) несущую способность.

Исследованию воздействия на ледяной покров различного вида динамических нагрузок посвящено немало работ. Однако, задача о посадке самолётов на ледяной покров остаётся до настоящего времени недостаточно изученной. Необходимо отметить, что эта проблема близка к исследованию использования больших плавучих конструкций (Very Large Floating Structures — VLFS) в качестве взлётно-посадочных полос. При посадке самолёта на ледяной покров задача прогнозирования разрушения плавающей пластины по-прежнему остаётся важной.

Нестационарное воздействие на плавающую упругую пластину нагрузки ранее рассматривалось отечественными и зарубежными учёными. Однако, ещё не до конца изучены процессы волнообразования при движении нагрузки по плавающей пластине с переменной силой давления; колебания плавающей пластины вследствие ударной нагрузки на неё сверху и последующего нестационарного движения нагрузки по пластине, а также влияние переменной глубины водоёма на колебания ледяного покрова от действия движущейся с критической скоростью нагрузки переменной интенсивности.

Целью данной работы является исследование колебаний плавающей упругой пластины при нестационарном воздействии на неё нагрузки, включая решение прикладных задач о колебаниях плавающего на поверхности жидкости ледяного покрова при взлёте и посадке на него самолётов.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Получение математических зависимостей, описывающих колебания упругой пластины при движении по ней с различной, в том числе и с критической, скоростью нагрузки переменной интенсивности в условиях постоянной и переменной глубины водоёма.
2. Построение численных алгоритмов для определения напряжённо-деформированного состояния (НДС) упругой пластины при нестационарном воздействии на неё нагрузки.
3. Разработка новых способов повышения несущей способности ледяного покрова, используемого в качестве переправ, ВПП, грузонесущих платформ и т.д.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Трёхмерная математическая модель деформирования ледяного покрова при взлёте и посадке на него самолёта, учитывающая изменения его скорости движения и давления на лёд.
2. Алгоритм расчёта прогибов и напряжений в ледяном покрове при нестационарном воздействии на него движущейся нагрузки.
3. Результаты экспериментально-теоретических исследований закономерностей деформирования ледяного покрова при нестационарном движении по нему нагрузки.

Научная новизна:

1. Решена трёхмерная задача о поведении плавающего бесконечного ледяного покрова под нагрузкой от самолёта при его взлёте и посадке.
2. Разработаны алгоритмы расчёта НДС ледяного покрова от воздействия на него нагрузки переменной интенсивности.
3. Проведены экспериментальные исследования закономерностей распространения изгибно-гравитационных волн (ИГВ) в плавающем модельном льду при движении по нему нагрузки с переменной скоростью.
4. Получены результаты экспериментально-теоретических исследований зависимости параметров ИГВ в ледяном покрове от изменения скорости движения нагрузки и глубины водоёма.

Практическая значимость. Разработанные алгоритмы и результаты расчётов могут быть использованы при прогнозировании несущей способности ледяного покрова при использовании его в качестве ВПП, специально обустраиваемых в северных и полярных районах, либо при выполнении аварийных посадок. Предложены зависимости по определению минимальной толщины ледяного покрова при его использовании в качестве ВПП.

Автором получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614422. Разработаны устройства, позволяющие повысить несущую способность ледяного покрова при использовании его в качестве ВПП и переправ (патенты РФ на изобретения № 2555990, 2565623, 2565710, 2622956, 2622959, 2622960, 2622967).

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- соблюдением принципов математического и физического моделирования;
- удовлетворительным совпадением результатов модельных экспериментов и теоретических расчётов;
- согласованием результатов данной работы с некоторыми результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

- Всероссийской конференции «Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение» приуроченной к 95-летию академика Л.В. Овсянникова (РФ, г. Новосибирск, 2014 г.);

- Международной конференции «24th International Ocean and Polar Engineering Conference» (Южная Корея, г. Пусан, 2014 г.);
- III научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении» (РФ, г. Комсомольск-на-Амуре, 2014 г.);
- Международном симпозиуме «11th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium» (КНР, г. Шанхай, 2014 г.);
- Международном симпозиуме «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы» (РФ, г. Комсомольск-на-Амуре, 2015 г.);
- XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (РФ, г. Казань, 2015 г.);
- Международной конференции «26th International Ocean and Polar Engineering Conference» (Греция, г. Родос, 2016 г.);
- Международном симпозиуме «12th Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium» (Австралия, г. Голд-Кост, 2016 г.);
- Международной конференции «27th International Ocean and Polar Engineering Conference» (США, г. Сан-Франциско, 2017 г.);
- Четвёртой Всероссийской конференции Полярная механика (РФ, г. Санкт-Петербург, 2017 г.).

Работа в целом докладывалась на заседании кафедры информационной безопасности, информационных систем и физики Амурского гуманитарно-педагогического государственного университета, на заседании кафедры технических дисциплин Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема и на семинаре в Институте машиноведения и металлургии ДВО РАН.

Личный вклад. Автор принимал активное участие в определении задач исследования, в разработке математического аппарата для достижения поставленной цели, проведении экспериментов и выполнении теоретических исследований, а также при анализе и обобщении полученных результатов. Все численные и аналитические расчёты, написание программ и анализ полученных результатов проведены автором самостоятельно.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 32 печатных изданиях, в том числе: 2 в журналах, рекомендованных ВАК; 7 в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus; 2 в журналах, входящих в международную систему цитирования Web of Science; 1 монографии; 7 патентах на изобретение РФ; 1 свидетельстве о государственной регистрации программы, 21 в других изданиях.

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 141 страницу с 64 рисунками, 4 таблицами и 1 приложением. Список литературы содержит 207 наименований.

Благодарности. Автор выражает благодарность к.ф.-м.н. А.В. Погореловой за ряд ценных замечаний при подготовке и обсуждении результатов диссертации, а также к.ф.-м.н. В.Л. Земляку за помощь в подготовке и проведении экспериментальных исследований.

Диссертационная работа была выполнена при поддержке грантов: Госзаказ Минобрнауки № госрегистрации АААА-А16-116093010012-2 «Исследования несущей способности и закономерностей разрушения ледяного покрова изгибно-гравитационными волнами», задание на выполнение государственных работ в сфере научной деятельности в рамках базовой части государственного задания вузу № 2014/422 проект № 487 «Повышение несущей способности ледяного покрова при использовании его в качестве ледовых переправ и грузонесущих платформ», инициативный проект № 9.4934.2017/БЧ «Определение влияния ледовых условий на несущую способность ледяного покрова при использовании его в качестве ледовых переправ», проект РФФИ № 16-38-00089 «Исследования напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова, вызванного движением по нему нагрузки переменной интенсивности».

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, определена цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна, практическая значимость и приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор научной литературы по изучаемой теме. При этом отмечено, что значительный вклад в разработку теоретических вопросов поведения плавающей на слое жидкости пластины при воздействии на неё различного вида нагрузок, внесли такие учёные как: А.Е. Букатов, С.С. Голушкевич, А.А. Коробкин, А.В. Марченко, А.В. Погорелова, И.В. Стурова, Л.А. Ткачёва, Д.Е. Хейсин и др. Экспериментальными исследованиями деформирования и разрушения ледяного покрова от действия движущихся нагрузок занимались: С.А. Бернштейн, Л.В. Голд, К.Е. Иванов, Н.Н. Кашкин, А. Крери, В.М. Козин, И.С. Песчанский, Ф. Пресс, Г.Я. Седов, В. Сквайер, В.Н. Смирнов, Т. Такизава и др. Проведён анализ, с целью определения уровня исследований и сущности известных способов и устройств повышения несущей способности ледяного покрова, используемого при обустройстве грузонесущих платформ, переправ, автозимников и т.д. Также рассмотрены проблемы и опыт эксплуатации ледяного покрова в качестве ВПП.

Вторая глава посвящена теоретическому исследованию колебаний плавающей упругой пластины при нестационарном воздействии на неё нагрузки.

Решение задачи о нестационарном движении по плавающей упругой пластине нагрузки с изменяющейся интенсивностью. Рассматривается задача о нестационарном движении распределённой нагрузки (на примере самолёта) по сплошному ледяному покрову. Нагрузка от самолёта представлена областью

давления $q'(x', y', t')$, движущаяся со скоростью $u'(t')$. Система координат совмещена с самолётом. Плоскость $x'O'y'$ совпадает с невозмущённой поверхностью раздела лёд — вода, ось x' совпадает с направлением движения самолёта, ось z' направлена вертикально вверх. Предполагается, что вода — идеальная несжимаемая жидкость плотностью ρ_2 , движение жидкости потенциальное. Глубина водоёма H , толщина ледяного покрова h . Ледяной покров моделируется упругой, изначально ненапряжённой однородной изотропной пластиной плотностью ρ_1 (рисунок 1).

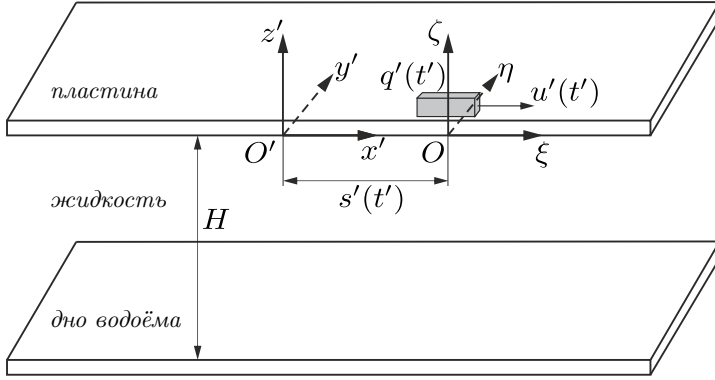


Рис. 1. Схема задачи.

Для аналитического решения задачи совершается переход к безразмерной постановке. В качестве характерного размера была выбрана глубина водоёма — H ; в качестве характерной скорости — скорость \sqrt{gH} . Вводятся безразмерные функции и параметры (штрихи обозначают размерную величину):

$$x = \frac{x'}{H}; \quad y = \frac{y'}{H}; \quad z = \frac{z'}{H}; \quad t = t' \sqrt{\frac{g}{H}}; \quad \Phi = \frac{\Phi'}{H\sqrt{gH}}; \quad w = \frac{w'}{H};$$

$$q = \frac{q'}{\rho_2 g}; \quad u = \frac{u'}{\sqrt{gH}}; \quad s = \frac{s'}{H}; \quad \mu = \frac{\mu'}{g}, \quad L = \frac{L'}{H}, \quad B = \frac{B'}{H}.$$

где: Φ — потенциал скорости жидкости; w — прогиб пластины; s — расстояние, пройденное нагрузкой; μ — ускорение нагрузки, L, B — длина и ширина прямоугольника.

Потенциал скорости жидкости удовлетворяет уравнению Лапласа:

$$\Delta \Phi = 0. \quad (1)$$

Линеаризованные граничные и начальные условия для функций Φ и w запишутся в виде:

$$\kappa \nabla^4 \frac{\partial \Phi}{\partial z} + \varepsilon \left(\frac{\partial^3 \Phi}{\partial z \partial t^2} - \dot{u} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial x} - 2u \frac{\partial^3 \Phi}{\partial t \partial x \partial z} + u^2 \frac{\partial^3 \Phi}{\partial x^2 \partial z} \right) =$$

$$= -\frac{\partial \Phi}{\partial z} - \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \dot{u} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - 2u \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t \partial x} + u^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} \right) - \frac{\partial q}{\partial t} + u \frac{\partial q}{\partial x}, \quad z=0, \quad (2)$$

где: $\nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$; $\kappa = D/(\rho_2 g H^4)$ — безразмерный параметр, отвечающий за силы жёсткости ледяной пластины; $\varepsilon = \rho_1 h/\rho_2 H$ — безразмерный параметр, отвечающий за силы инерции ледяной пластины.

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0, t=0} = 0, \quad \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial t} \right) \Big|_{z=0, t=0} = 0, \quad \text{при взлёте,} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_{z=0, t=0} = 0, \quad w|_{t=0} = 0, \quad \text{при посадке.} \quad (4)$$

Предполагается, что расстояние, пройденное нагрузкой и изменение её скорости с течением времени, могут быть выражены формулами:

$$s(t) = \begin{cases} \frac{\mu t^2}{2}, & \text{при взлёте} \\ u_p t - \frac{\mu t^2}{2}, & \text{при посадке} \end{cases} \quad u(t) = \begin{cases} \mu t, & \text{при взлёте} \\ u_p - \mu t, & \text{при посадке.} \end{cases} \quad (5)$$

Для давления, создаваемого нагрузкой, использовалась формула:

$$q(x,y,t) = \begin{cases} (P - F_L(t))/S_c \rho_2 g H, & (x,y) \in \Omega; \\ 0, & (x,y) \notin \Omega. \end{cases} \quad (6)$$

где: Ω – это поверхность под шасси самолёта (область распределения нагрузки $q(x,y,t)$); S_c – площадь распределения нагрузки; $F_L(t)$ – подъёмная сила крыла; P – максимальная взлётный вес самолёта.

Подъёмная сила крыла $F_L(t)$ для взлёта и посадки рассчитывалась по формулам:

$$F_L(t) = \frac{1}{2} \rho_a u^2(t) A_w C_L(t); \quad (7)$$

$$C_L(t) = a_L e^{b_L t}, \quad (8)$$

где: $C_L(t)$ – коэффициент подъёмной силы; параметры a_L и b_L приведены в качестве констант для случаев взлёта и посадки; ρ_a – плотность воздуха; A_w – площадь крыла самолёта.

Прогиб ледяной пластины $w(x,y,t)$ будем искать в виде:

$$w = w_1 + w_2, \quad (9)$$

$$w_1(x,y,t) = -\frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\lambda d\lambda}{1 + \kappa \lambda^4} \int_0^\lambda \frac{D_1 d\alpha}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}} \int_0^t \beta \sin(\beta(t - \tau)) q(\tau) \times \\ \times \cos(\alpha(s(t) - s(\tau)) + \alpha x + \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} y) d\tau, \quad (10)$$

$$w_2(x,y,t) = -\frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{\lambda d\lambda}{1 + \kappa \lambda^4} \int_0^\lambda \frac{D_1}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}} q(0) \cos(\beta t) \cos(\alpha s(t) + \alpha x + \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} y) d\alpha,$$

где:

$$D_1 = \frac{\sin\left(\frac{B\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}}{2}\right) \sin\left(\frac{L\alpha}{2}\right)}{\alpha \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}}.$$

Для расчёта максимальных нормальных напряжений в ледяном покрове используется формула:

$$\sigma_{xx} = -\frac{6}{h^2} \left(D \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \right). \quad (11)$$

Численный расчёт прогиба ледяной пластины при взлёте и посадке самолёта с использованием формулы (9) проводился для следующих значений параметров: $E = 5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$; $\nu = 1/3$; $\rho_1 = 900 \text{ кг/м}^3$; $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\rho_a = 1,205 \text{ кг/м}^3$; $H = 100 \text{ м}$. В качестве нагрузки был выбран самолёт Ил-76ТД со следующими характеристиками: вес

самолёта $P = 1,48$ МН; площадь крыла $A_w = 300$ м²; суммарная площадь распределения нагрузки $S_c = 4,5$ м²; начальная скорость (u_0): взлёт – 0 м/с, посадка – 58 м/с; ускорение (μ): взлёт – 1,54 м/с², посадка – 1,91 м/с²; параметры подъёмной силы крыла: взлёт ($a_L = 1,5 \cdot 10^{-3}$, $b_L = 0,135$), посадка ($a_L = 1,220$, $b_L = -0,212$). Заметим, что формула (9) применялась к трём шасси (двум задним и одному переднему), моделируемым прямоугольниками с заданными длинами L и ширинами B (рисунок 2). Полученные решения накладывались друг на друга.

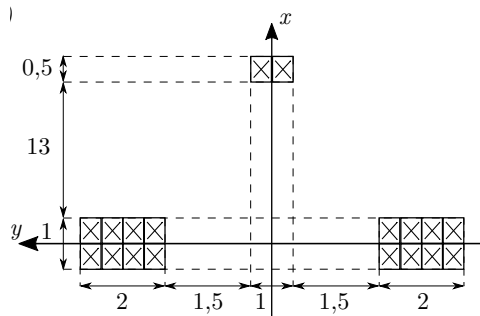


Рис. 2. Схема распределения нагрузки от шасси самолёта Ил-76ТД (все размеры указаны в метрах).

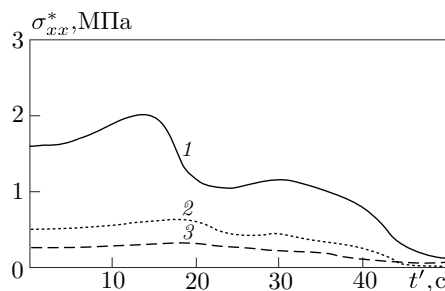


Рис. 3. Максимум абсолютной величины нормальных напряжений σ_{xx}^* в зависимости от времени при взлёте самолёта Ил-76ТД: 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 2$ м; 3 – $h = 3$ м.

Расчёты нормальных напряжений по зависимости (11) показали, что максимум абсолютной величины нормальных напряжений $\sigma_{xx}^* = \max_{x \in (-\infty; +\infty)} |\sigma_{xx}|$ при $y = 0$ м всегда находится под задней стойкой шасси (в точке $x = 0$ м). На рисунке 3 представлены зависимости максимума абсолютного значения нормальных напряжений σ_{xx}^* от времени. Из рисунка 3 видно, что, как для взлёта, так и для посадки, величина σ_{xx}^* с течением времени сначала возрастает, достигая наибольшей величины при времени t^* , а затем убывает. Обозначим максимальное значение величины σ_{xx}^* буквой A . Очевидно, что критическое время t^* и значения максимума нормальных напряжений $A = \max_{t \in (0; +\infty)} \sigma_{xx}^*$ (при глубокой воде) зависят от толщины пластины. Увеличение толщины пластины приводит к уменьшению величины A . Максимальные напряжения при взлёте больше аналогичных значений при посадке. С увеличением толщины пластины происходит увеличение критического времени t^* при взлёте и уменьшение критического времени t^* при посадке.

Решение задачи о совместном влиянии ударного импульса и последующего нестационарного движения нагрузки. В момент времени $t' = 0$ пластина нагружается ударным импульсом $Y'(x', y', t')$, который возникает в момент касания шасси поверхности ВПП. Область приложения ударного импульса $\Omega_0(x', y')$ моделируется двумя прямоугольниками, расположенными под задними шасси самолёта. Система координат располагается следующим образом: начало координат совмещено с центром области $\Omega_0(x', y')$, плоскость $x'O'y'$ совпадает

с невозмущённой поверхностью раздела пластина — жидкость, ось z' направлена вверх. Предполагается, что движение жидкости потенциальное (рисунок 4).

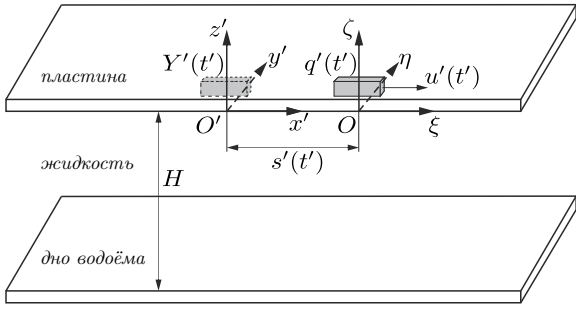


Рис. 4. Схема задачи.

Для аналитического решения задачи совершается переход к безразмерной постановке (штрихи соответствуют размерным величинам):

$$x = \frac{x'}{H}, \quad y = \frac{y'}{H}, \quad z = \frac{z'}{H}, \quad L = \frac{L'}{H}, \quad B = \frac{B'}{H},$$

$$w_1 = \frac{w_1'}{H}, \quad t = t' \sqrt{\frac{g}{H}}, \quad \Phi_1 = \frac{\Phi_1'}{H \sqrt{gH}},$$

$$q = \frac{q'}{\rho_2 g}, \quad u = \frac{u'}{\sqrt{gH}}, \quad Y = \frac{Y'}{\rho_2 g H}, \quad b = b' \sqrt{\frac{H}{g}},$$

где: w_1 — прогиб ледяного покрова от воздействия ударного импульса; Φ_1 — потенциал скорости движения жидкости; q — давление, производимое нагрузкой при нестационарном движении; Y — ударный импульс; b — константа ударной функции.

Уравнение Лапласа для потенциала скорости движения жидкости имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_1}{\partial z^2} = 0. \quad (12)$$

Линеаризованное кинематическое условие для прогиба пластины w_1 и функции потенциала скоростей жидкости Φ_1 переписывается в виде:

$$\kappa \left(\frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right) w_1 + \varepsilon \frac{\partial^2 w_1}{\partial t^2} + w_1 + \frac{\partial \Phi_1}{\partial t} = -Y(x, y, t) \quad z=0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} = 0 \quad z=-1, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \Phi_1}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial w_1}{\partial t} \quad z=0. \quad (15)$$

Ударная нагрузка:

$$Y(x, y, t) = \begin{cases} Y_0 P(t), & x \in [-L/2; L/2], \quad y \in [-B/2; B/2] \\ 0, & x \notin [-L/2; L/2], \quad y \notin [-B/2; B/2], \end{cases} \quad (16)$$

где: $Y_0 = \frac{m u_y}{S_1}$; m — масса самолёта; u_y — вертикальная составляющая скорости самолёта; S_1 — площади области Ω_0 , состоящая из двух прямоугольников, моделирующих задние шасси; $P(t)$ — ударная функция.

Вертикальная составляющая скорости самолёта в момент касания шасси поверхности ВПП определяется по следующей эмпирической формуле:

$$u_y = \sqrt{0,5(0,28u_p + 0,01\sqrt{mg} + 8)}, \quad (17)$$

где u_p — посадочная скорость самолёта.

Предполагается, что зависимость ударной функции от времени может быть задана в виде:

$$P(t) = \begin{cases} \frac{b}{2} \sin(bt), & 0 \leq t \leq \frac{\pi}{b} \\ 0, & t > \frac{\pi}{b}. \end{cases} \quad (18)$$

Формула для расчёта прогибов ледяного покрова, вызванных совместным влиянием ударного импульса и нестационарного движения нагрузки, запишется в следующем виде:

$$w(x, y, t) = w_0(x + s(t), y, t) + w_1(x, y - r_2/2, t) + w_1(x, y + r_2/2, t), \quad (19)$$

где: w_0 рассчитывается по формуле (9), w_1 по формуле (20); r_2 – расстояние между двумя задними стойками шасси, $s(t)$ – расстояние, пройденное самолётом.

$$w_1(x, y, t) = -\frac{2bY_0}{\pi^2} \int_0^\infty \sqrt{\frac{n}{c}} \frac{\lambda d\lambda}{n} \int_0^\lambda \frac{d\alpha}{\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}} \cos(\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2} y) \cos(\alpha x) \times \\ \times \frac{\sin\left(\frac{B\sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}}{2}\right) \sin\left(\frac{L\alpha}{2}\right)}{\alpha \sqrt{\lambda^2 - \alpha^2}} \int_0^t \sin(b\tau) \sin\left(\sqrt{\frac{c}{n}}(t - \tau)\right) d\tau. \quad (20)$$

Параметры для расчётов: $H = 100$ м, $\rho_1 = 900$ кг/м³, $\rho_2 = 1000$ кг/м³, $\rho_a = 1,2054$ кг/м³, $E = 5 \cdot 10^9$ Н/м², $\nu = 1/3$, $b' = 4\pi$ с⁻¹, $Y_0' = 1,61 \cdot 10^5$ кг/м·с.

Рассмотрим совместное влияние ударного импульса и нестационарного движения по пластине (см. рисунок 4). Для этого наложим решение (9) для трёх прямоугольников (1 переднее шасси и 2 задних), и решение (20) для двух прямоугольников (2 задних шасси). На рисунке 6 показаны прогибы ледяного покрова толщиной $h = 3$ м в разные моменты времени. Анализируя представленные графики, мы можем сделать следующие выводы: максимальный прогиб ледяного покрова от действия ударной нагрузки приходится на время $t \leq 0,25$ с; в момент времени $t \geq 10$ с влияние ударной нагрузки на общую величину прогиба незначительно; изгибно-гравитационная волна от ударной нагрузки с течением времени начинает отставать от волны, вызванной движением самолёта.

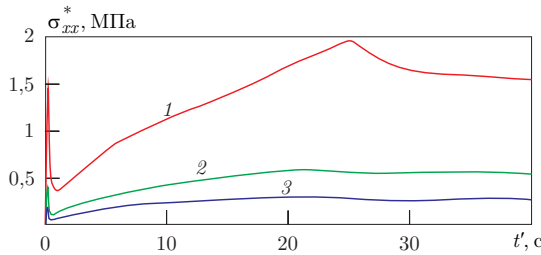


Рис. 5. Максимум абсолютной величины нормальных напряжений $\sigma_{xx}^* = \max_{x \in (-\infty; +\infty)} |\sigma_{xx}|$ в зависимости от времени.

Кривые: 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 2$ м; 3 – $h = 3$ м.

На рисунке 5 показаны максимальные значения абсолютной величины нормальных напряжений $\sigma_{xx}^* = \max_{x \in (-\infty; +\infty)} |\sigma_{xx}|$ в зависимости от времени для разных значений толщины льда. В представленных на рисунке 5 зависимостях видны два максимума: первый максимум обусловлен

ударной нагрузкой; второй максимум образуется в результате торможения самолёта в момент, когда скорость его движения близка к критической скорости. Заметим, что напряжения, возникающие при ударе шасси самолёта о лёд и при переходе через критические скорости движения, соизмеримы по абсолютной величине. Однако, максимум напряжений от торможения всегда больше максимума от удара для любой толщины льда.

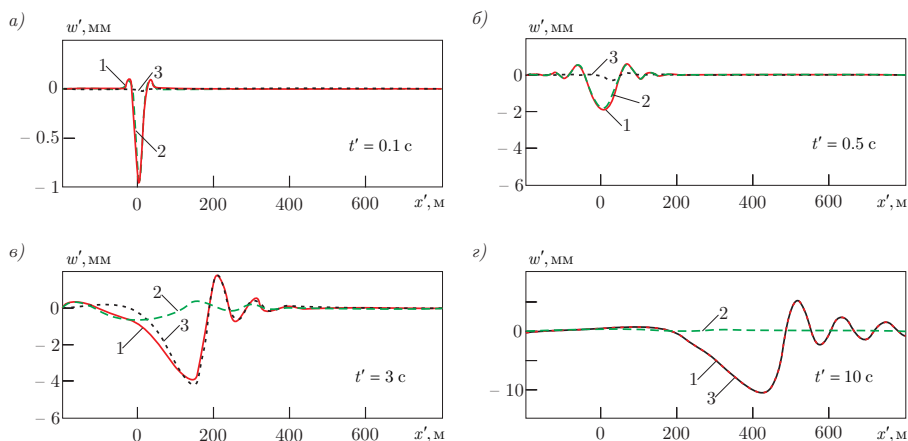


Рис. 6. Прогибы ледяного покрова толщиной $h=3$ м: а) $t'=0,1$ с; б) $t'=0,5$ с; в) $t'=3$ с; г) $t'=10$ с. Кривая 1 соответствует совместному воздействию ударной нагрузки и нестационарного движения самолета; кривая 2 – воздействие только ударной нагрузки; кривая 3 – воздействие только нестационарного движения самолета.

Исследование влияния переменности глубины водоёма на колебания плавающей упругой пластины при нестационарном движении по ней нагрузки с изменяющейся интенсивностью. Предполагается, что движение жидкости потенциальное, $\Phi'(x',y',z',t')$ – функция потенциала скоростей жидкости, удовлетворяющая уравнению Лапласа $\Delta\Phi' = 0$. Пусть глубина водоёма является функцией переменной x' : $H' = H'(x')$ (H' – глубина водоёма в точке $x = 0$) (рисунок 7).

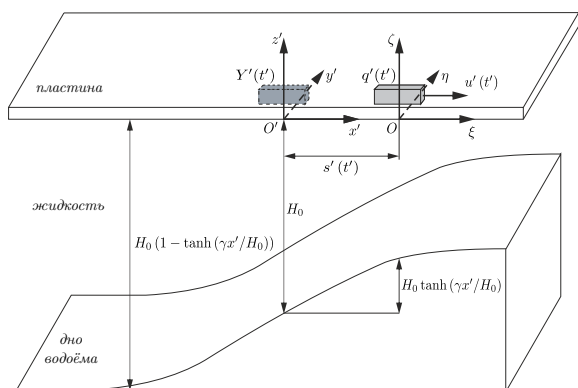


Рис. 7. Схема задачи.

Перейдем к безразмерной постановке задачи, введя характерный линейный размер – глубину водоёма H_0 , соответствующую начальному положению (в момент времени $t' = 0$) центра нагрузки $x' = y' = 0$:

$$x = \frac{x'}{H_0}; \quad y = \frac{y'}{H_0}; \quad z = \frac{z'}{H_0}; \quad u = \frac{U}{\sqrt{gH_0}};$$

$$H = \frac{H'}{H_0}; \quad t = t' \sqrt{\frac{g}{H_0}}; \quad \Phi = \frac{\Phi'}{H_0 \sqrt{gH_0}};$$

$$\tilde{w} = \frac{w'}{H_0}; \quad q = \frac{q'}{\rho_2 g H_0}.$$

Здесь w' , \tilde{w} — размерная и безразмерная величины прогиба пластины соответственно; $H = H(x)$ — безразмерная глубина водоёма.

Линеаризованные граничные и начальные условия для функций \tilde{w} и Φ имеют вид

$$\kappa \nabla^4 \tilde{w} + \varepsilon \frac{\partial^2 \tilde{w}}{\partial t^2} + \tilde{w} + \frac{\partial \Phi}{\partial t} = -q, \quad z=0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z} = \frac{\partial \tilde{w}}{\partial t}, \quad z=0; \quad (22)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} = 0, \quad z=-H. \quad (23)$$

Здесь $\kappa = D/(\rho_2 g H_0^4)$; $\varepsilon = \rho_1 h/(\rho_2 H_0)$.

Начальные условия для функции $\Phi(x, y, z, t)$ записываются в виде:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right|_{z=0, t=0} = 0; \quad \left. \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \varepsilon \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z \partial t} \right) \right|_{z=0, t=0} = 0. \quad (24)$$

Предполагается, что в безразмерной постановке глубина водоёма изменяется по закону $H = 1 - \tanh(\gamma x)$, где γ — тангенс угла наклона донной поверхности к плоскости $x'O'y'$ в точке, соответствующей начальному положению центра нагрузки (рисунок 7).

Введём новую систему координат $O\xi\eta\zeta$, совмещённую с нагрузкой:

$$\xi = x - s; \quad \eta = y; \quad \zeta = z/(1 - \tanh(\gamma x)), \quad (25)$$

($s = s(t)$ — безразмерное расстояние, пройденное нагрузкой за время t).

Заметим, что в новой системе координат на дне водоёма выполняется условие $\zeta = -1$, а величина прогиба пластины определяется по формуле:

$$w = \tilde{w}/(1 - \tanh(\gamma x)). \quad (26)$$

При малых значениях угла наклона донной поверхности ($|\gamma| \ll 1$) асимптотическое решение для функций Φ и w будем искать в виде:

$$\Phi = \Phi_0 + \gamma \Phi_1 + O(\gamma^2); \quad |\gamma| \ll 1; \quad (27)$$

где Φ_0 — потенциал скорости жидкости, соответствующий постоянной глубине водоёма $H = 1$ ($\gamma = 0$).

$$w = w_0 + \gamma w_1 + O(\gamma^2); \quad |\gamma| \ll 1, \quad (28)$$

где w_0 — прогиб пластины при постоянной глубине водоёма $H = 1$ ($\gamma = 0$).

Прогиб пластины при нестационарном движении переменной по времени нагрузки в условиях переменной глубины водоёма:

$$w' \approx (w_0 + \gamma w_1) H_0 (1 - \tanh(\gamma x)), \quad |\gamma| \ll 1. \quad (29)$$

В соответствии с (9) выражение для w_0 имеет вид:

$$w_0 = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty k dk \int_{-\pi}^\pi d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I_1 + I_2}{1 + \varkappa k^4} \exp(ik((\xi - x_1)\cos\theta + (\eta - y_1)\sin\theta)) dx_1 dy_1; \quad (30)$$

$$I_1 = F'_{1t}(1 + \varepsilon k \tanh k) e^{\sigma s} \cosh k; \quad I_2 = q(x_1, y_1).$$

$$w_1 = -\frac{1}{4\pi^2} \int_0^\infty k dk \int_{-\pi}^\pi d\theta \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{I_3 + I_4 + I_5}{1 + \kappa k^4} \times \\ \times \exp(ik((\xi - x_1)\cos\theta + (\eta - y_1)\sin\theta)) dx_1 dy_1; \quad (31)$$

$$I_3 = [(AF_1)'_t(\tanh k + \varepsilon(k + \tanh k)) + A'_{1t}(1 + \varepsilon k \tanh k)] e^{\sigma s} \cosh k;$$

$$I_4 = \varepsilon F'_{1t}(x_1 + s) k \tanh k e^{\sigma s} \cosh k; \quad I_5 = (I_1 + I_2) \left(x_1 + s - \frac{4\kappa\sigma k^2}{1 + \kappa k^4} \right).$$

$$F_1 = -\int_0^t \cos(\beta(t-\tau)) \frac{q(\tau) \exp(-\sigma s(t))}{(1 + \varepsilon k \tanh k) \cosh k} d\tau + \frac{\sin(\beta t)}{\beta} \frac{q(0)}{(1 + \varepsilon k \tanh k) \cosh k},$$

$$\beta = \sqrt{\frac{k \sinh k (1 + \kappa k^4)}{(1 + \varepsilon k \tanh k) \cosh k}}, \quad \sigma = ik \cos \theta,$$

$$A = \frac{\sigma}{2k} - k(x_1 + s(t)), \quad A_1 = \int_0^t f_2(\tau) \frac{\sin(\beta(t-\tau))}{\beta} d\tau,$$

$$f_2(t) = \frac{1}{(1 + \varepsilon k \tanh k) \cosh k} \left[(x_1 + s(t)) \times \right. \\ \times \left(F''_{1tt} + \frac{\dot{q}(t) \exp(-\sigma s(t)) + \sigma u(t) q(t) \exp(-\sigma s(t))}{(1 + \varepsilon k \tanh k) \cosh k} \right) - \\ \left. - F_1 A (\tanh k + k) (1 + \kappa k^4) - (F_1 A)''_{tt} (\varepsilon \tanh k + \varepsilon k + \tanh k) + F_1 4\kappa\sigma k^3 \tanh k \right].$$

В случае посадки самолёта окончательная формула для расчёта прогиба пластины будет иметь следующий вид:

$$w'(x, y, t) = w_h(x, y, t) + w_y(x, y - r_2/2, t) + w_y(x, y + r_2/2, t), \quad (32)$$

где w_h вычисляется по формуле (29), w_y по формуле (20).

Параметры для расчётов: $E = 5 \cdot 10^9 \text{ Н/м}^2$, $h = 3 \text{ м}$, $\nu = 1/3$, $\rho_1 = 900 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_a = 1,205 \text{ кг/м}^3$, $H_0 = 40 \text{ м}$. Диапазон изменения угла наклона дна: $0^\circ - 35^\circ$.

На рисунке 8 показаны результаты расчётов высоты волны в зависимости от времени. Анализируя кривые на рисунке 8 отметим, что во время посадки самолёта наблюдается незначительное уменьшение высоты волны при движении в направлении возрастания глубины водоёма, т.е. когда нагрузка движется от берега. Значительного влияния переменности глубины водоёма следует ожидать в случае движения нагрузки с постоянной скоростью, близкой к минимальной фазовой скорости, при большем угле наклона донной поверхности и малой толщине льда. Таким образом, при большой глубине водоёма (более 40 м) расположение ВПП относительно берега не будет

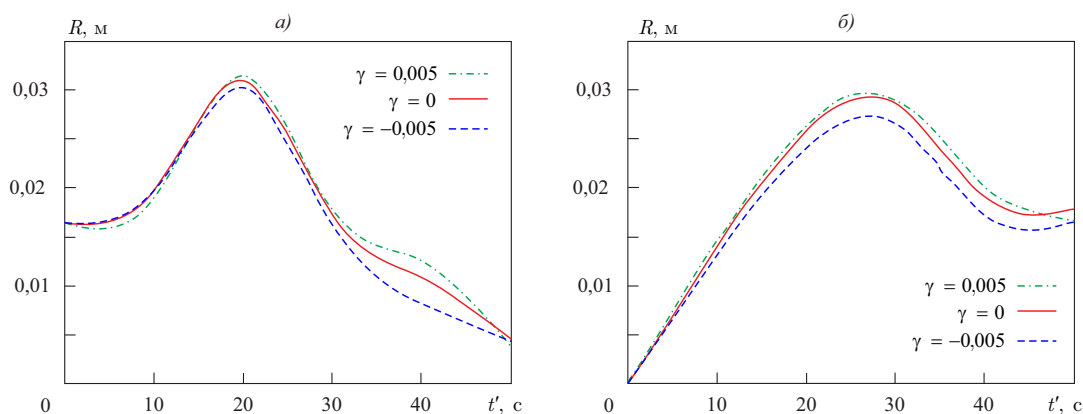


Рис. 8. Высота волны во время взлёта и посадки самолёта Ил-76ТД в зависимости от времени при различных значениях γ : а) взлёт самолёта; б) посадка самолёта.

оказывать значительного влияния на величину деформаций ледяного покрова как при взлёте, так и при посадке самолёта.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям поведения плавающей упругой пластины при движении по её поверхности нагрузки.

Моделирование ИГВ, возбуждаемых в сплошном неразрушаемом ледяном покрове, проводилось в опытовом бассейне лаборатории ледотехники ФГБОУ ВО Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема (г. Биробиджан). Размеры бассейна – $L \times B \times H = 10 \times 3 \times 1$ м. В качестве модельного льда применялась листовая резина толщиной 3 мм. Значение модуля упругости резины составило $E_m = 7,504$ МПа, что позволило проведение экспериментов в масштабе 1:133.

Буксировка модели осуществлялась по поверхности модельного льда толщиной $h = 3 \cdot 10^{-3}$ м, глубине водоёма $H = 0,7$ м при различных скоростях движения. Рассматривалось два режима движения нагрузки: 1) быстрое ускорение — движение с постоянной скоростью; 2) равноускоренное движение — движение с постоянной скоростью — равнозамедленное движение (рисунок 9).

С целью подтверждения достоверности полученных в главе 2 результатов теоретических расчётов было проведено их сопоставление с результатами модельных экспериментов. Анализ результатов показал, что при движении модели с постоянной скоростью высота волны будет иметь большие значения, чем при движении с ускорением. Следовательно, большую опасность при использовании ледяного покрова в качестве ВПП будет представлять равномерное движение. Принимая во внимание тот факт, что при движении со сверхкритическими скоростями во льду возникают минимальные напряжения, рекомендуется во время выполнения маневров на ледовом аэродроме, когда движение как правило равномерное, выбирать скорости больше критической с условием быстрого прохождения резонансного режима. Меньшие значения высоты волны при равноускоренном движении можно объяснить быстрым переходом через критическую скорость, что позволяет сократить время развития ИГВ (своеобразную

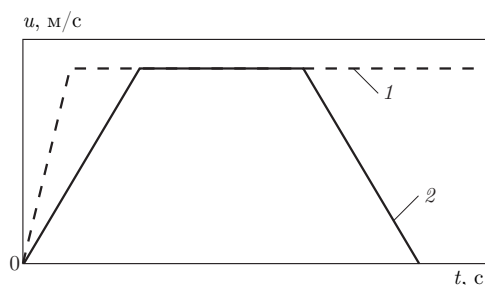


Рис. 9. Режимы движения нагрузки:

- 1 — стационарный режим;
- 2 — нестационарный режим.

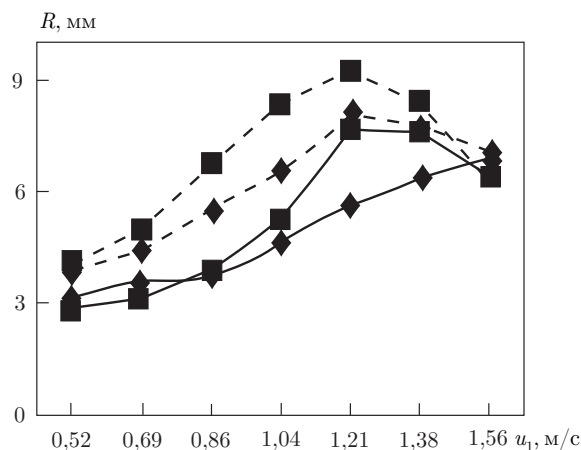


Рис. 10. Высота волны при нестационарном движении (сплошные линии – эксперимент, пунктирные линии – теоретические расчёты): (◆) – равноускоренное движение, (■) – равномерное движение.

раскачку) до больших амплитуд прогиба ледяного покрова (рисунок 10). Отметим, что в случае равнозамедленного движения амплитуда колебаний модельного льда будет меньше, чем при равноускоренном и равномерном режимах движения. Данный вывод согласуется с результатами теоретических расчётов, приведёнными в главе 2.

В четвертой главе даны рекомендации по практическому использованию полученных в диссертации результатов, а также приведено описание разработанных новых способов увеличения несущей способности ледяного покрова.

В качестве критерия оценки несущей способности ледяного покрова при использовании его качестве ВПП используется предел прочности льда на изгиб $\sigma_f = 2,1$ МПа.

Произведём расчёт минимально допустимой толщины ледяного покрова h_{min} , при этом будем использовать наиболее вероятные характеристики льда. Для расчёта примем следующие параметры: температура льда $t = -20$ °С, плотность льда $\rho_1 = 900$ кг/м³, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, модуль упругости $E = 5 \cdot 10^9$ Па, глубина водоёма $H = 100$ м. Интенсивность воздействия нагрузки на ледяной покров будет зависеть от скорости её движения. При движении нагрузки с критической скоростью будет происходить наиболее интенсивное волнообразование.

На рисунке 11 представлена зависимость максимальных абсолютных значений нормальных напряжений A , рассчитанная с использованием формулы (11), от толщины ледяного покрова при различных режимах движения самолёта Ил-76ТД. Как видно из рисунка, большие напряжения во льду возникают при равномерном движении с критической скоростью по сравнению с ускоренным движением. Отметим также, что наименьшую нагрузку на лёд оказывает равнозамедленное движение. Данные выводы хорошо согласуются с результатами экспериментов.

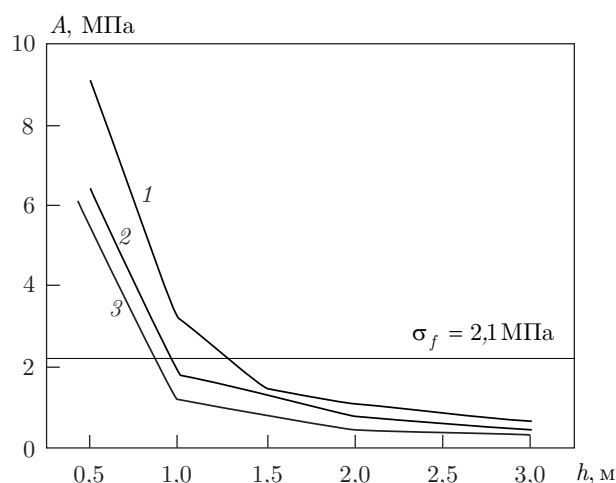


Рис. 11. Зависимость максимального абсолютного значения нормальных напряжений A от толщины льда при различных режимах движения самолёта Ил-76ТД: 1 — движение с критической скоростью; 2 — равноускоренное движение; 3 — равнозамедленное движение.

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Разработана трёхмерная математическая модель деформирования ледяного покрова при нестационарном воздействии на него нагрузки в виде самолёта, совершающего взлёт и посадку. Модель позволяет учитывать: переменность давления, оказываемого самолётом; его ударное воздействие в момент касания шасси поверхности льда; изменение глубины акватории; физико-механические параметры ледяного покрова; режимы движения самолёта.
2. Предложены алгоритмы решения трёхмерной задачи о деформировании ледяного покрова при использовании его в качестве ВПП. Выполнено сравнение результатов вычислений по предложенной модели с результатами, полученными другими авторами и показавшие их удовлетворительное совпадение.
3. Проведены экспериментальные исследования колебаний модельного слоя льда при движении по нему нагрузки с различными скоростями. Выполнено сопоставление результатов теоретических и экспериментальных исследований, получено их хорошее согласование.
4. Разработаны рекомендации по использованию ледяного покрова в качестве ВПП с учётом ледовой обстановки.
5. В результате информационно-патентного поиска собран обширный материал по вопросам упрочнения льда, на основании которого разработаны новые способы повышения несущей способности ледяного покрова, используемого в качестве ледяных переправ, автозимников и ВПП.

Публикации автора по теме диссертации

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Погорелова А.В., Козин В.М., Матюшина А.А. Исследование напряжённо-деформированного состояния ледяного покрова при взлёте и посадке на него самолёта // ПМТФ. – 2015. – Т. 56. – № 5. – С. 214 – 221.
2. Козин В.М., Верещагин В.Ю., Земляк В.Л., Верещагина А.С., Матюшина А.А. Зависимость энергетического критерия разрушения ледяного покрова от его заснеженности // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: механика предельного состояния. – 2015. – № 4(26). – С. 82 – 87.

Публикации в изданиях, входящих в международную систему цитирования Web of Science:

3. Pogorelova A.V., Kozin V.M., Matyushina A.A. Stress-strain state of ice cover during aircraft takeoff and landing // Journal of Applied Mechanics and Technical Physics. – 2015. – Vol. 56. – № 5. – P. 920 – 926.
4. Matiushina A.A., Pogorelova A.V., Kozin V.M. Effect of Shock Pulse Load on the Ice Cover During Landing of an Airplane // International Journal of Offshore and Polar Engineering. – 2016. – Vol. 26. – № 1. – P. 6 – 12.

Публикации в изданиях, входящих в международную систему цитирования Scopus:

5. Pogorelova A.V., Kozin V.M., Matyushina A.A. Ice Plate Deflections during Aircraft Take-off and Landing // Proc. of the 24th (2014) Int. Ocean and Polar Engineering Conf. Busan, Korea, June 15-20, 2014, pp. 1035 – 1042.
6. Matiushina A.A., Pogorelova A.V., Kozin V.M. Effect of Shock Pulse Load on the Ice Cover During Landing of an Airplane // Proc. of the 25th (2015) Int. Ocean and Polar Engineering Conf. Kona, Big Island, Hawaii, USA, June 21 – 26, 2015, pp. 1843 – 1848.
7. Pogorelova A.V., Matiushina A.A., Kozin V.M. et al. Modeling of an Airplane Take-off and Landing on the Ice Cover in Variable Water Depth Conditions // Proc. of the 26th (2016) Int. Ocean and Polar Engineering Conf. Rhodos (Rodos), Greece, June 26 – July 1, 2016, pp. 1187 – 1191.
8. Kozin V.M., Zemlyak V.L., Matiushina A.A. et al. Methods of Assessment of Ice-Breaking Capacity of Flexural-Gravity Waves Generated by Moving Loads // Proc. of the 27th (2017) Int. Ocean and Polar Engineering Conf., San Francisco, California, USA, June 25 – June 30, 2017, pp. 1326 – 1331.

Монография:

9. Козин В.М., Погорелова А.В., Земляк В.Л. и др. Экспериментально-теоретические исследования зависимости параметров распространяющихся в плавающей пластине изгибно-гравитационных волн от условий их возбуждения. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2016 г., 222 с. ISBN 978-5-7692-1504-9.

Объекты интеллектуальной собственности:

10. Погорелова А.В., Матюшина А.А. Вычисление прогиба ледяного покрова при взлёте и посадке самолёта ИЛ-76ТД. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614422. заявл. 28.02.2014; зарегистр. 24.04.2014. – 1 с.
11. Патент РФ на изобретение № 2555990. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / Козин В.М., Погорелова А.В., Матюшина А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АмГПГУ, ФГБУН ИМиМ ДВО РАН. – № 2014119479/03; заявл. 14.05.14; опубликовано 10.07.15, Бюл. № 19. – 4 с.
12. Патент РФ на изобретение № 2565623. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / Козин В.М., Погорелова А.В., Матюшина А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АмГПГУ, ФГБУН ИМиМ ДВО РАН. – № 2014119478/03; заявл. 14.05.14; опубликовано 20.10.15, Бюл. № 29. – 5 с.
13. Патент РФ на изобретение № 2565710. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / Козин В.М., Погорелова А.В., Матюшина А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО АмГПГУ, ФГБУН ИМиМ ДВО РАН. – № 2014119477/05; заявл. 14.05.14; опубликовано 20.10.15, Бюл. № 29. – 4 с.
14. Патент РФ на изобретение № 2622956. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / Козин В.М., Земляк В.Л., Матюшина А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУ им. Шолом-Алейхема, ФГБОУ ВПО АмГПГУ, ФГБУН ИМиМ ДВО РАН, Земляк В.Л. – № 2016115933; заявл. 22.04.16; опубликовано 21.06.17, Бюл. № 18. – 4 с.
15. Патент РФ на изобретение № 2622959. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / Козин В.М., Земляк В.Л., Матюшина А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУ им. Шолом-Алейхема, ФГБОУ ВПО АмГПГУ, ФГБУН ИМиМ ДВО РАН, Земляк В.Л. – № 2016115926; заявл. 22.04.16; опубликовано 21.06.17, Бюл. № 18. – 5 с.
16. Патент РФ на изобретение № 2622960. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / Козин В.М., Земляк В.Л., Матюшина А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУ им. Шолом-Алейхема, ФГБОУ ВПО АмГПГУ, ФГБУН ИМиМ ДВО РАН, Земляк В.Л. – № 2016115941; заявл. 22.04.16; опубликовано 21.06.17; Бюл. № 18. – 6 с.
17. Патент РФ на изобретение № 2622967. Способ увеличения несущей способности ледяного покрова / Козин В.М., Земляк В.Л., Матюшина А.А. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО ПГУ им. Шолом-Алейхема, ФГБОУ ВПО АмГПГУ, ФГБУН ИМиМ ДВО РАН, Земляк В.Л. – № 2016115943; заявл. 22.04.16; опубликовано 21.06.17, Бюл. № 18. – 4 с.

Публикации в других изданиях:

18. Козин В.М., Матюшина А.А. Исследование влияния внутренней напряженности в плавающей ледяной пластине на её деформации от действия движущейся нагрузки // Морские интеллектуальные технологии. – 2014. – 1(23). – С. 53 – 58.
19. Козин В.М., Погорелова А.В., Матюшина А.А. Исследование колебаний ледяного покрова при взлёте и посадке самолёта на ледовые аэродромы // Тезисы докладов Всероссийской конференции «Новые математические модели механики сплошных сред: построение и изучение» приуроченная к 95-летию академика Л.В. Овсянникова, Новосибирск, 18 – 22 апреля 2014 г. С. 76.
20. Козин В.М., Погорелова А.В., Матюшина А.А. Колебания плавающего ледяного покрова при взлёте и посадке на него самолётов // Тезисы докладов II Всероссийской конференции «Полярная механика», Санкт-Петербург, 3-5 июня 2014 г. С. 34.
21. Козин В.М., Матюшина А.А. Прогибы ледяного покрова во время взлёта и посадки самолёта // Сборник докладов международной конференции, приуроченной к 75-летию академика В.А. Левина «Успехи механики сплошных сред», Владивосток, 28 сентября – 4 октября 2014 г. С. 241 – 245.
22. Козин В.М., Матюшина А.А. Влияние внутренней напряжённости в плавающем ледяном покрове на величину его прогиба от действия движущейся нагрузки // Тезисы докладов Дальневосточной школы-семинара «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», 30 сентября – 3 октября, 2014. – С. 16.
23. Козин В.М., Матюшина А.А. Исследование влияния нестационарности движения нагрузки по плавающей ледяной пластине на её деформированное состояние // Тезисы докладов Дальневосточной школы-семинара «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», Владивосток, 30 сентября – 3 октября 2014 г. С. 17.
24. Козин В.М., Погорелова А.В., Матюшина А.А. Деформации плавающего ледяного покрова при взлёте и посадке на него самолёта // Тезисы докладов Дальневосточной школы-семинара «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», Владивосток, 30 сентября – 3 октября 2014 г. С. 19.
25. Pogorelova A.V., Kozin V.M., Matiushina A.A. Critical Stresses of Ice Cover as Fracture Criterion during Take-off and Landing of an Airplane // Proc. of the 11th (2014) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium. Shanghai, China, October 12 – 16, 2014, pp. 121 – 126.
26. Козин В.М., Погорелова А.В., Матюшина А.А. Воздействие ударной нагрузки на ледяной покров // Международный симпозиум «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы», Комсомольск-на-Амуре, 12 – 16 мая 2015 г. С. 241 – 244.

27. Козин В.М., Матюшина А.А. Влияние ударной нагрузки, моделирующей посадочный удар, на колебания ледяного покрова при посадке самолёта // XI Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, Казань, 20 – 24 августа 2015 года. С. 1855 – 1857.
28. Погорелова А.В., Козин В.М., Матюшина А.А. и др. Ледяной покров переменной толщины, подверженный ударной нагрузке // Тезисы докладов III Всероссийской конференции «Полярная механика», Владивосток, 26 – 29 сентября 2016 г. С. 93 – 103.
29. Matiushina A.A., Pogorelova A.V., Kozin V.M. et al. Effect of a load on the cover of variable thickness // Proc. of the 12th (2016) Pacific/Asia Offshore Mechanics Symposium Gold Coast/Brisbane, Australia, October 3 – 7, 2016, pp. 553 – 557.
30. Козин В.М., Матюшина А.А. Взлёт и посадка самолёта на ледяной покров в условиях переменной глубины водоёма // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема, Биробиджан. 2016. № 4 (25). С. 50 – 60.
31. Козин В.М., Матюшина А.А. Движение нагрузки по ледовому покрову при его переменной толщине // II Дальневосточная школа-семинар «Фундаментальная механика в качестве основы совершенствования промышленных технологий, технических устройств и конструкций», 11 – 15 сентября, 2017 г. – С. 53 – 55.
32. Козин В.М., Земляк В.Л., Матюшина А.А. Нестационарное движение нагрузки по ледяному покрову // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции «Полярная механика», Санкт-Петербург, 14 – 15 сентября 2017 г. С. 59 – 60.

Матюшина Анна Александровна

КОЛЕБАНИЯ ПЛАВАЮЩЕЙ УПРУГОЙ ПЛАСТИНЫ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА НЕЁ НАГРУЗКИ

01.02.04 — механика деформируемого твёрдого тела

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати 02.04.2018 г.

Печать офсетная. Бум. тип. № 2. Формат 60×84 1\16
Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 2,05. Тираж 100 экз. Заказ № 2347

Издательство АмГПГУ:

681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Кирова, д. 17 корп. 2.

Отпечатано в издательско-полиграфическом отделе АмГПГУ:
681000, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Кирова, д. 17 корп. 2.