

К.В. Горелова

Днепропетровский национальный университет им. Олеса Гончара

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТОПЛИВА В БАКАХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С УЧЕТОМ СЕТЧАТЫХ ФАЗОРАЗДЕЛИТЕЛЕЙ

Розглянуто рух рідини в баку прямокутної форми під дією постійної горизонтальної збурюючої сили. Дослідження проводяться з урахуванням вимушених коливань вільної поверхні для періоду першого сплеску рідини. Представлена експериментальна модель баку з сітчастим фазороздільником, що дозволяє оцінити характер переорієнтації вільної поверхні рідини. Проведено чисельні розрахунки гідродинамічних параметрів рідини. На підставі отриманих результатів проведено порівняльний аналіз чисельних розрахунків з експериментальними даними.

Ключові слова: космічний літальний апарат, понижена гравітація, сітчастий розподільник фаз, профіль вільної поверхні, вимушені коливання рідини.

Рассматривается движение жидкости в баке прямоугольной формы под действием постоянной горизонтальной возмущающей силы. Исследования проводятся с учётом вынужденных колебаний свободной поверхности для периода первого всплеска жидкости. Представлена экспериментальная модель бака с сетчатым фазоразделителем, позволяющая оценить характер переориентации свободной поверхности жидкости. Проведены численные расчеты гидродинамических параметров жидкости. На основании полученных результатов проведен сравнительный анализ численных расчетов с экспериментальными данными.

Ключевые слова: космический летательный аппарат, пониженная гравитация, сетчатый разделитель фаз, профиль свободной поверхности, вынужденные колебания жидкости.

The motion of the fluid in the tank with rectangular shape is considered under a constant horizontal disturbing force. Investigations have done in view of the forced oscillations of the free surface for the period of the first fluid burst. Presented experimental model of the tank with a net phase separator allows to assess the reorientation nature of the liquid free surface. Numerical calculations of the hydrodynamic parameters of the liquid have been obtained. Based on these results, a comparative analysis of numerical calculations with experimental data have been presented.

Keywords: spacecraft, low gravity, mesh phase separator, the free surface profile, liquid forced oscillations.

Введение. Современный этап развития ракетно-космической техники характеризуется значительным расширением сферы ее использования, как для нужд народного хозяйства, так и для оборонных целей. Значительно сложнее становятся программы полетов космических аппаратов (КА). Орбитальные станции, космические пилотируемые и грузовые корабли, спутники научного и прикладного характера, военные системы за время своего функционирования на орбите (которое может длиться от нескольких месяцев до нескольких лет), производят различные маневры: сближения, стыковки, межорбитальные переходы, посадки на планеты. Многократные включения двигательной установки (ДУ) сменяют участки пассивного полета аппаратов. Для выполнения этих маневров и обеспечения безаварийных повторных запусков ДУ в условиях пониженной интенсивности гравитационных сил и больших амплитуд перемещений жидкости актуальной и важной задачей стало проектирование топливных баков (ТБ) и внутрибаковых устройств (ВБУ), способных длительное время удерживать топливо или его часть у заборного устройства (ЗУ) и обеспечивать подачу топлива без газовых включений. Задача существенно усложняется тем фактом, что маневры на

орбите начинают к моменту времени, когда основной запас топлива уже выработан и его количество не превышает 5 – 10% от начального заполнения. В этом случае даже небольшие перекосы свободной поверхности топлива, вызванные манерами КА, могут привести к оголению ЗУ ТБ. В настоящее время для удержания и управления течением топлива в условиях орбитального полета КА, спроектирован и исследован целый ряд капиллярных систем обеспечения сплошности топлива (СОСТ) [1; 14]. Эффективность управления положением жидкости в условиях пониженной гравитации определяется способностью СОСТ обеспечивать слив жидкости из бака без газа в любой требуемый момент времени.

Наибольшей универсальностью, среди различных типов СОСТ обладают тканые металлические сетки, или так называемые сетчатые разделители фаз (СРФ). СРФ могут быть использованы в широком диапазоне разнонаправленных внешних силовых воздействий, для обеспечения высоких уровней расхода топлива, для высокоманевренных ЛА. В настоящее время разработаны и успешно функционируют десятки различных СОСТ сетчатого типа. Главным рабочим элементом любого сетчатого СОСТ является тканая металлическая сетка с ячейками микронных размеров, в которых происходит отделение жидкости от газа. Элементы тканой сетки устанавливаются в специальные «окна» на опорной раме, которая, в свою очередь, формирует внутри бака области свободные от газовой фазы на протяжении всего полета КЛА.[1; 4]

Постановка задачи. Различными аспектами проблемы динамики и переориентирования жидкости в движущихся резервуарах занимались ученые: Г.С. Нариманов, Д.Е. Охочимский, Б.И. Рабинович, К. С. Колесников, Н.Н. Моисеев, Г.Н. Микишев, И.А. Луковский, Х.Н. Абрамсон, Дж. Тегарт и др. Благодаря их усилиям созданы математические модели движения твердого телам, частично заполненными жидкостью, и разработаны различные методы решения задачи с полостями [9 – 14]. В настоящее время наибольший прогресс достигнут при исследовании линейного приближения проблемы, то есть при введении предположений об идеальности жидкости, о безвихревом характере ее движения в резервуаре, а также о том, что все параметр, характеризующие движение объекта и жидкости столь малы, что можно пренебречь их произведениями, квадратами и более высокими степенями по сравнению с членами, линейно зависящими от величин этих параметров. Задачи линейной теории наиболее просты для математического анализа и опираются на фундаментальные результаты Н.Е. Жуковского при построении потенциала скорости жидкости, заполняющей подвижный бак [11 – 13].

В настоящее время применение линейной теории в расчетной инженерной практике не вызывает принципиальных трудностей. Ее достоверность подтверждена результатами сравнения многочисленных теоретических и экспериментальных данных, полученных для различных баков, вплоть до амплитуд колебаний жидкости равных 0.15 радиуса свободной поверхности. При амплитудах жидкости превышающих 0.25 радиуса свободной поверхности проявляются нелинейные эффекты. Объяснить эти явления в рамках линейной теории невозможно даже качественно, поэтому для исследований колебаний жидкости, происходящих с большой амплитудой, необходимо рассматривать решение соответствующих гидродинамических задач в нелинейной постановке [2; 8].

Для решения данного класса задач существует ряд различных методов численного расчета: метод контрольного объема, метод конечных элементов и т.д., которые имеют присущие им как достоинства, так и недостатки. Поэтому выбор

єдиного методу крайнє затруднен. Сложность в построении математической модели динамики поведения жидкости в емкости с капиллярным СФР (даже для упрощенного случая плоской задачи) определяется наличием сложного перехода от макроструктур к микроструктурам.

Одним из таких комплексных методов является комбинированный Лагранже-Эйлеровый подход. На начальном этапе построения численного аналога вся расчетная область представляет собой совокупность контрольных объемов (макроструктура), заключенных в едином объеме бака. При переходе от одного контрольного объема к последующему наступает момент, когда границы этих объемов перемещаются в область пористой микроструктуры сетки или перфорированной пластины. В этом случае определяют две основных области: надсеточная и подсеточная, в которых и необходимо перепостроение расчетной сетки контрольных объемов. Фактически, эта необходимость объясняется тем, что вблизи поверхности СРФ жидкостной поток разделяется [4; 7].

При построении математической модели использовался ряд упрощающих допущений:

- емкость представляет собой контейнер прямоугольной формы с заданными характерными геометрическими размерами;
- поверхность СФР является плоской, параллельной днищу емкости и расположенной от него на расстоянии H_0 .

Математическая модель исследования свободной поверхности в баке прямоугольной формы с СФР. Математическая модель исследования свободной поверхности жидкости в прямоугольном баке с СФР детально представлена в [4] и предполагает разбиение надсеточной и подсеточной областей на элементарные контрольные объемы.

Движение жидкости в контейнере описывается уравнением Эйлера в виде

$$\frac{d\bar{V}}{dt} = \bar{a}_M - \frac{1}{\rho} \nabla p + \bar{a}_D, \quad (1)$$

где \bar{a}_M – боковое ускорение; \bar{a}_D – динамическая составляющая ускорения.

Уравнение (1) в проекциях на оси координат принимает вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{\partial t} &= a_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x}, \\ \frac{\partial V_y}{\partial t} &= g_0 - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} - \xi_c \frac{\rho V_y^2}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где ξ_c – коэффициент гидросопротивления СФР.

В начальный момент времени

$$\begin{cases} V_x^0 = V_y^0 = 0, \\ a_x^0 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Через время Δt исследуемый контейнер с жидкостью движется со скоростью $(V_x^{\Delta t}, V_y^{\Delta t})$, при этом профиль свободной поверхности жидкости изменяется. Координаты центров масс контрольных объемов в подсеточной области (рис. 1) остаются неизменными.

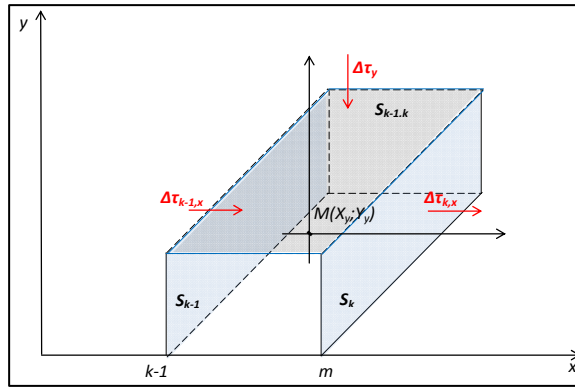


Рис.1. Перемещение массы объема (подсеточная область):
т. $M(X_c; Y_c)$ – центр масс k -го контрольного объема

Координаты центров масс для контрольных объемов в надсеточной области (рис. 2) контейнера имеют вид

$$\begin{cases} y_i^{n+1} = \frac{\tau_i^{n+1}}{2\Delta x} + H_0, \\ x_i^{n+1} = x_i^n, \end{cases} \quad (4)$$

где H_0 – координата СФР, определяемая как расстояние от днища контейнера до СФР, τ_i^{n+1} – площадь поперечного сечения i -го объема жидкости на $(n+1)$ - слое.

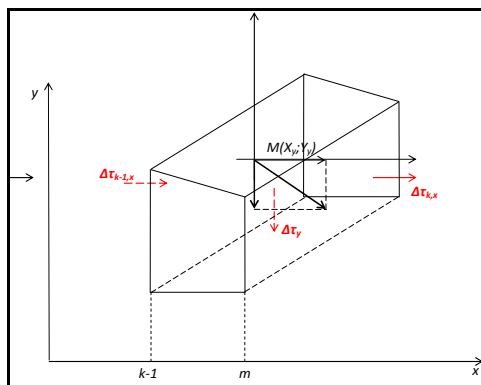


Рис.2. Перемещение массы объема (надсеточная область):
т. $M(X_c; Y_c)$ – центр масс k -го контрольного объема

Построенный алгоритм расчета позволяет учитывать предысторию изменения профилей свободной поверхности с учетом разделения потока и определения скоростей в надсеточной и подсеточной областях.

В расчетной схеме СФР, как регулярная сетчатая структура, является барьером, препятствующим динамике топлива, и определяющим переход к пористой структуре с микронными размерами. Поэтому необходимо перепостроение расчетной области контрольных объемов при приближении к околосеточной области с учетом

нового промежутка времени, необходимого для перехода системы в стабильное состояние

Давление контрольных объемах в надсеточной области равно:

$$P_i = \rho h_i \sqrt{g_0^2 + a_x^2} . \quad (5)$$

Давление контрольных объемов в подсеточной области:

$$P_i = \rho h_i \sqrt{g_0^2 + a_x^2} - \xi_c \frac{\rho (V_i)_y^2}{2} , \quad (6)$$

где $\xi_c = 0,14 + \frac{21,8}{Re_c}$ – коэффициент гидросопротивления и $Re_c = \frac{d_y V_y}{\nu_{жс} f_c}$ – число

Рейнольдса; d_y – диаметр ячейки СФР; $\nu_{жс}$ – кинематическая вязкость жидкости; f_c – коэффициент живого сечения СФР [5; 9].

Определение профилей свободной поверхности жидкости. С учетом полученных результатов численных расчетов для случая колебаний жидкости в баке прямоугольной формы математическая формулировка задачи имеет вид [1; 9]:

$$\nabla^2 \bar{\Phi} = \bar{\Phi}_{xx} + \bar{\Phi}_{zz} = 0 , \quad (7)$$

$$\bar{\Phi}_z = 0 \text{ при } Z = -H_0 , \quad (8)$$

$$\bar{\Phi}_x = 0 \text{ при } X = \pm 1 , \quad (9)$$

$$Bo H_{xx} - \alpha H + \dot{\bar{\Phi}} = \bar{a}_M \text{ при } Z = 0 , \quad (10)$$

$$\dot{H} = -\dot{\bar{\Phi}}_z \text{ при } Z = 0 , \quad (11)$$

где X и Z – безразмерные координаты; H – безразмерный профиль свободной поверхности жидкости; T – безразмерное время; $\bar{\Phi}$ – безразмерный потенциал скорости; Bo – критерий Бонда.

Решение задачи (7) – (11) отыскиваем с помощью метода Фурье. Таким образом, профиль свободной поверхности жидкости во время возмущенного движения бака определяется по следующей формуле [5]:

$$H = \sum_k \psi_k \sin(m_k x) m_k \text{sh}(m_k H_0) . \quad (12)$$

Экспериментальные исследования вынужденных колебаний жидкости. Исследования проводились на созданной экспериментальной установке, представленной на рис. 3.

Экспериментальная установка предназначена для исследования профилей свободной поверхности в емкостях при воздействии на них незначительными боковыми возмущениями. Прямоугольная форма емкости может быть использована для создания новых и усовершенствования существующих элементов внутрибаковых ЗУ для цилиндрических, сферических и тороидальных баков реальных конструкций КЛА.

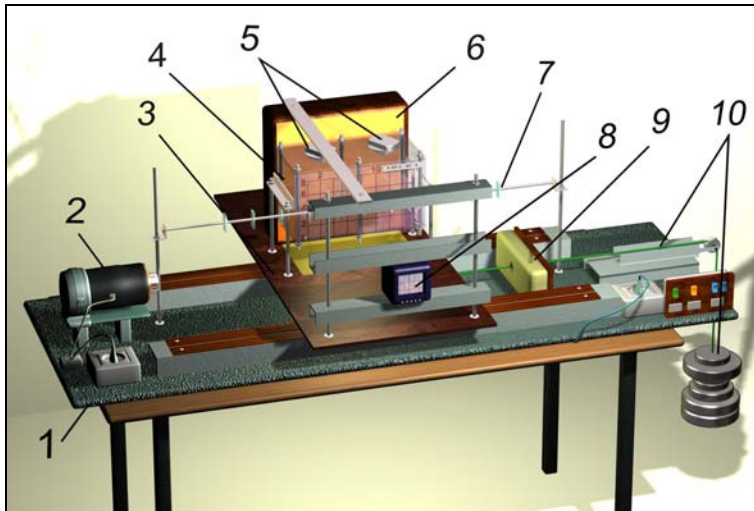


Рис. 3. Вид экспериментальной установки: 1 – опорная плита с направляющими; 2 – электромагнит; 3 – подвижный блок; 4 – экспериментальная модель с СФР; 5 – заправочно-сливные штуцеры; 6 – блок подсветки; 7 – устройство фиксации текущей координаты; 8 – устройство видеозаписи; 9 – амортизационная подушка; 10 – блок создания горизонтального ускорения

Конструкция установки позволяет подвергать исследуемую модель поперечным ускорением до величин порядка 5 м/сек^2 в течение времени $\sim 0,48 \text{ сек}$.

Изготовленная из оргстекла экспериментальная модель бака с СФР представлена на рис. 4. Такая конструкция модели позволяет наглядно оценить характер переориентации свободной поверхности жидкости, а также зафиксировать факт прохождения газовой фазы через сетчатый СФР с образованием газовых пузырей в подсеточной области экспериментальной модели бака.

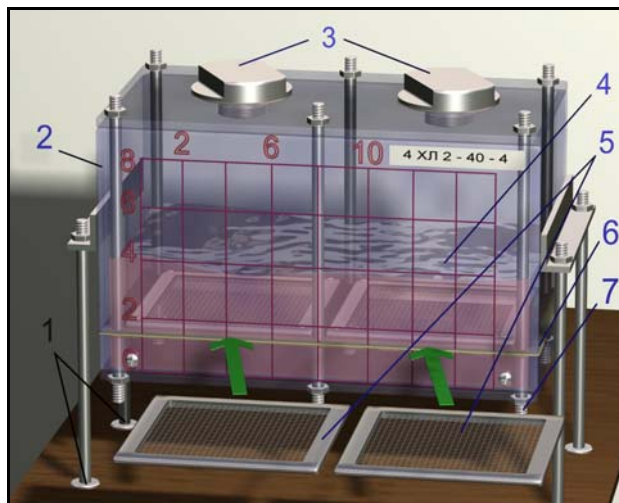


Рис. 4. Экспериментальная модель бака с СФР: 1 – опорные стержни; 2 – экспериментальная модель бака (материал - оргстекло); 3 – заправочно-сливные штуцеры; 4 – экспериментальная модельная жидкость; 5 – элементы СФР с опорной рамой; 6 – уплотняющая прокладка; 7 – соединительные стержни

Экспериментальные исследования проводились с использованием модельных жидкостей – бутанола и 4-х хлористого углерода с соответствующими физическими параметрами [13; 14].

Результаты расчетов В работе представлен алгоритм и методика для расчёта основных гидродинамических параметров вынужденных колебаний жидкости и построены профили свободной поверхности жидкости для периода первого всплеска.

Для проведения численно-параметрических исследований были приняты следующие исходные данные [3, 6]:

- геометрические размеры бака – 100 мм × 200 мм × 100 мм;
- высота заполнения над СФР – $h = 20$ мм;
- СФР – тканная стальная сетка полотняного типа плетения;
- характеристики СФР: $d_{я} = 40$ мкм – диаметр ячейки; $d_{п} = 30$ мкм – диаметр проволоки; $f_c = 0,33$ – свободное сечение СФР;
- масса блока создания горизонтального ускорения варьировалась в диапазоне $0,5 \div 3,0$ кг.

С учетом принятых предположений были проведены экспериментальные исследования динамики модельной жидкости баке прямоугольной формы с СФР. На рис. 5 представлен профиль свободной поверхности, соответствующий всплеску жидкости при массе лока создания горизонтального ускорения 0,5 кг за время 0,46 сек после начала движения экспериментальной модели бака.



Рис.5. Экспериментальные результаты исследования динамика свободной поверхности жидкости за период первого всплеска

На основании полученных результатов проведен сравнительный анализ изменения профиля свободной поверхности, рассчитанного с использованием метода Фурье (12) и численного расчета в постановке (2) – (4).

На рис. 6 представлена графическая интерпретация сравнительного анализа численного и аналитического методов с экспериментом, и установлено, что полученные результаты согласуются с экспериментальными данными.

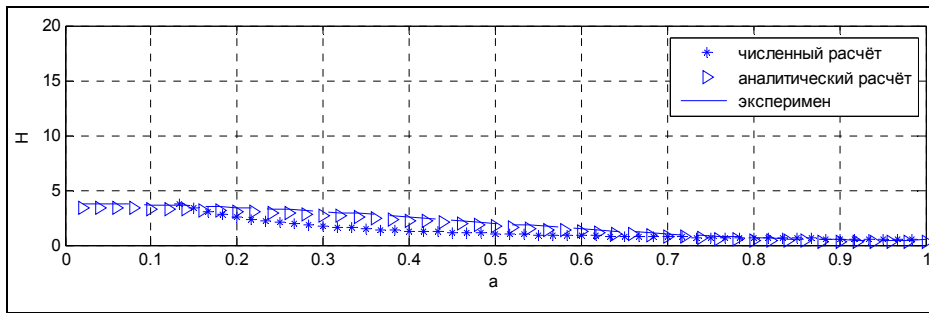


Рис. 6. Сравнительный анализ полученных результатов численного и аналитического расчетов с результатами эксперимента

Выводы. Впервые на созданной экспериментальной установке проведены экспериментальные исследования динамики жидкости в баках прямоугольной формы с СФР при воздействии на них незначительными боковыми возмущениями.

Построена математическая модель колебаний жидкости в баке прямоугольной формы с СФР под действием постоянной горизонтальной возмущающей силы с учётом вынужденных колебаний свободной поверхности.

С помощью аналитического подхода с использованием модели Коши – Пуассона исследован профиль свободной поверхности жидкости. Проведен численный расчет основных гидродинамических параметров жидкости в баке с СФР и построен профиль свободной поверхности. На основании полученных результатов проведен сравнительный анализ. Установлено, что результаты численных и аналитических расчетов профилей свободной поверхности согласуются с полученными экспериментальными данными.

Результаты эксперимента являются исходными данными для эскизного проектирования и позволяют оценить выбор параметров проектирования различных внутрибаковых заборных устройств с учетом модификации математической модели поведения жидкости в баке под действием внешней возбуждающей силы.

Библиографические ссылки

1. **Безуглый В.Ю.** Гидромеханика в слабых силовых полях / В.Ю. Безуглый, А.С. Макарова, Н.Н. Ясько. – Днепропетровск, 1987. – 80 с.
2. **Богомаз Г.И.** Колебания жидкости в баках. Методы и результаты экспериментальных исследований / Г.И. Богомаз, С.А. Сирота // Ин-т техн. механики НАНУ и НКАУ. – Днепропетровск, 2002. – 306 с.
3. **Варгафтик Н.Б.** Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик – М., 1972. – 720 с.
4. **Горелова К.В.** Моделирование динамических процессов топлива в баках летательных аппаратов в условиях пониженной гравитации / К.В. Горелова // Вісник Дніпропетр. ун-ту. Серія «Механіка». – Дніпропетровськ, 2012. – Вип.16, т. 1.– С. 148 – 154.
5. **Горелова К.В.** Моделирование вынужденных колебаний свободной поверхности в баках космических летательных аппаратов / К.В. Горелова // Восточно-европейский журнал передовых технологий. Серія «Прикладная физика и материаловедение». – Харьков, 2013. – Вып. №5. – С. 23 – 32.
6. **Государственный стандарт.** Сетки проволочные тканые с квадратными ячейками нормальной точности. ГОСТ 6613–73. – М., 1973. – 17 с.

7. **Давыдов С.А.** Численный расчет взаимодействия свободной поверхности жидкости с сетчатой разделительной перегородкой / С.А.Давыдов // Сб. научн. тр. «Математическое моделирование в механике жидкости и газа». – Днепропетровск, 1992. – С. 72 – 77.

8. **Йи К.К.** Свободные и вынужденные колебания жидкости в осесимметричном резервуаре в условиях слабого тяготения / К.К. Йи // «Прикладная механика». – 1967. – №1. – С. 98 – 106.

9. **Колесников К.С.** Колебания жидкости в цилиндрическом сосуде / К.С. Колесников. – М., 1964. – 370 с.

10. **Кочин Н.Б.** Теоретическая гидромеханика / Н.Б. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – М., 1955 – Т.1. – 510 с.

11. **Луковский И.А.** Нелинейные колебания жидкости в сосудах сложной геометрической формы / И.А. Луковский. – Киев, 1975. – 135 с.

12. **Луковский И.А.** Математические модели нелинейной динамики твердых тел с жидкостью / И.А. Луковский. – Киев, 2010. – 408 с.

13. **Микишев Г.Н.** Экспериментальные методы в динамике космических аппаратов / Г.Н. Микишев. – М., 1978. – 248 с.

14. **Abramson H. N.** The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers with Applications to Space Vehicle Technology NASA SP-106 / H. N. Abramson. – Washington, D. C., 1966. – 468 p.

Надійшла до редколегії 22.10.13.

УДК 519.6

Н. Н. Беляев, Н. В. Росточило, А. Ю. Чорная

*Днепропетровский национальный университет
железнодорожного транспорта им. академика В. Лазаряна*

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКРАНА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТА ПРИ МИГРАЦИИ ХИМИЧЕСКИ ОПАСНОГО ВЕЩЕСТВА В АТМОСФЕРЕ

Розроблена модель для визначення ефективності екранів для локального захисту будівель при міграції токсичних речовин. Модель базується на використанні рівнянь переносу аероіонів та моделі нев'язкої нестислої рідини. Розв'язання задачі знаходиться за допомогою різницьових схем.

Ключові слова: захист будівель, забруднення атмосфери, чисельне моделювання.

Разработана модель для определения эффективности экранов для локальной защиты зданий при миграции токсичных веществ. Модель базируется на использовании уравнений переноса аэроионов и модели невязкой несжимаемой жидкости. Решение задачи находится с помощью разностных схем.

Ключевые слова: защита зданий, загрязнение атмосферы, численное моделирование.

A model to estimate the effectiveness of the local shields to protect buildings in the case of the pollutant dispersion in the atmosphere was developed. The model is based on the pollutant dispersion equation and the model of the potential flow. To solve the model equations the difference schemes are used.

Key words: protection of buildings, pollution of the atmosphere, numerical simulation.

Введение. В настоящее время большой интерес проявляется к проблеме защиты людей при возникновении риска поражения химически опасными веществами