

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

ДНІПРОПЕТРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису
УДК 538.6.011.8

Бразинський Вадим Іванович

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ МАСОПЕРЕНОСУ
НАВКОЛО ТІЛ, ЯКІ РУХАЮТЬСЯ В ВЕРХНІХ ШАРАХ
АТМОСФЕРИ

Спеціальність 01.02.05 - Механіка рідини, газу і плазми

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Дніпропетровськ - 1996

716 35.389
Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Інституті технічної механіки Національної Академії наук та Національного космічного агентства України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, старший науковий співробітник ВАСС В. П.

Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних наук,
професор ПРИХОДЬКО О.А.,
- кандидат технічних наук
ЯСКЕВИЧ Е.П.

Провідна установа - Фізико-технічний інститут низьких температур Національної Академії наук України.

Захист дисертації відбудеться 24 вересня 1996 р.
о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 03.01.07 при Дніпропетровському державному університеті.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Дніпропетровського державного університету.

Адреса університету:

320625 МСП, м. Дніпропетровськ, провулок Науковий, 13.

Автореферат розіслано 13 серпня 1996 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор фізико-математичних наук,
професор

Кочубей
КОЧУБЕЙ О.О.

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00739394 (Z)

I. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ. Створення нових зразків космічних апаратів (КА) та розширення програм по дослідженню навколоземного космічного простору пред'являє підвищені вимоги до точності розрахунків їх аерогазодинамічних характеристик та надійності роботи бортових систем. При русі КА в атмосфері Землі навколо них формується власна зовнішня атмосфера (ВЗА), джерелами якої є: частинки набігаючого потоку; продукти десорбції, дегазації та сублімації матеріалів зовнішніх покриттів; направлені потоки систем орієнтації і стабілізації; продукти витікання і скидання атмосфери з гермовідсіків, а також різного роду технологічних відходів. Таке навколооб'єктове середовище призводить до забруднення оптичної апаратури, впливає на проведення наукових та технологічних експериментів у космосі, що потребує застосування спеціальних затінюючих екранів та інших захисних засобів. Наявність зон підвищеної концентрації частинок ВЗА може перешкоджувати функціонуванню оптичних систем астроорієнтування КА.

Таким чином, задачі визначення параметрів ВЗА є досить актуальними, оскільки їх вирішення дозволяє отримати оцінку шкідливого впливу різних факторів на елементи КА. Врахування цього впливу на етапі проектування КА сприяє підвищенню надійності функціонування бортових систем та наукового обладнання.

МЕТА РОБОТИ полягає у розробці методик, алгоритмів і програмних засобів для моделювання процесів масопереносу навколо КА різної форми і проведенні чисельних досліджень особливостей формування газової компоненти ВЗА КА під впливом різних початкових умов в набігаючому потоці та на поверхні КА.

МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ. При вирішенні поставлених задач використовувались методи теорії імовірностей, інтегральних рівнянь та імітаційного статистичного моделювання на ЕОМ.

НАУКОВА НОВИЗНА РОБОТИ полягає в наступному:

1. Побудована математична модель формування ВЗА КА, що об'єднуються багатокомпонентним гіперзвуковим потоком при наявності газовідділення в їх поверхонь.
2. Запропонована методика вирішення тривимірних задач по розрахунку вільномолекулярних течій навколо тіл складної форми в

врахуванням ефектів інтерференції, обертання і взаємного затінення елементів конструкції, яка базується на комплексному використанні метода інтегрування по поверхні та метода Монте-Карло.

3. Вперше в розрахунковій практиці досліджені газодинамічні особливості гіперзвукового ($V_{\infty} = 80$ км/с) обтікання КА "Вега" газопиловим потоком.

4. Запропонована розрахункова модель та проведені дослідження сумарних і локальних зворотних потоків до контролюємих поверхонь з врахуванням відносних швидкостей і молекулярного складу набігаючого потоку і продуктів дегазації зовнішніх покриттів КА.

ОБГРУНТОВАНІСТЬ І ДОСТОВІРНІСТЬ основних результатів, отриманих в дисертації, базується на використанні строгого математичного опису досліджуваних газодинамічних процесів; тестуванні програмного забезпечення на вирішенні модельних задач, що мають точні розв'язки; порівнянні даних чисельних досліджень з результатами лабораторних і натурних експериментів. Окремі з них порівнювались з результатами, що отримані за допомогою методів вирішення модельних рівнянь Вольцмана, стаціонарного статистичного моделювання (методом Власова) та нестационарного прямого статистичного моделювання (методом Верда).

ПРАКТИЧНА ЦІННІСТЬ РОБОТИ. Розроблені методики та алгоритми розрахунків реалізовані в програмних модулях, які впроваджені в розрахункову практику ДКВ "Южное", ряду інших проектних організацій бувшого СРСР та вклучені в Галузевий фонд алгоритмів і програм. Модуль розрахунку параметрів ВЗА КА вклучено до складу багатопільового пакету прикладних програм (ППП) "Висота".

За допомогою створеного методологічного і програмного забезпечення виконано параметричні дослідження газодинамічних параметрів навколо різних КА ("Вега", "Космос-1643, 2007", "Спектр", "Либідь", "Марс-96" та інших), які були використані при виборі основних проектних параметрів цих апаратів.

АПРОБАЦІЯ РОБОТИ. Основні результати дисертаційної роботи доповідалися і були обговорені на Шостому Всесоюзному з'їзді з теоретичної та прикладної механіки (м. Ташкент, 1986 р.), Всесоюзних конференціях з динаміки розріджених газів (VII - м. Северодонецьк, 1980р., VIII - м. Москва, 1985р., IX - м. Свердловськ, 1987р.), VII Науко-

вих читаннях з космонавтики (м. Москва, 1983р.), нараді Астрономічної Ради АН СРСР (м. Апатити, 1983р.), Всесоюзному семінарі "Про стан та проблеми розвитку аналітичних та чисельних методів дослідження процесів масопереносу" (м. Дніпропетровськ, 1982р.), Всесоюзному науково-технічному семінарі (м. Куйбишев, 1984р.) та Всесоюзних нарадах з прикладної аеродинаміки (м. Дніпропетровськ, 1984р. та 1986р.), семінарі кафедри N105 Московського авіаційного інституту, щорічній науковій школі-семінарі ЦАГІ (м. Жуковський, 1992р.) та 5-му міжнародному симпозіумі "Аерокосмічна індустрія та екологія. Проблеми конверсії і безпеки" (м. Дніпропетровськ 1995р.).

СТРУКТУРА І ОБ'ЄМ РОБОТИ. Дисертація складається зі вступу, чотирьох глав, висновків, списку літератури з 90 найменувань та додатку. Загальний обсяг дисертації складає 103 сторінки друкованого тексту, 24 малюнки та 2 таблиці.

ПУБЛІКАЦІЇ. За матеріалами дисертації опубліковано 17 друкованих робіт.

II. ЗМІСТ РОБОТИ.

У вступі показано актуальність теми дисертаційної роботи. Дається короткий аналіз існуючих методів розрахунку процесів масопереносу сильно розріджених газів. Формулюється мета досліджень та дається загальна характеристика роботи.

Перша глава присвячена постановці та розв'язку задачі визначення газодинамічних параметрів (ГДП) навколо випуклих тіл.

В розділі 1.1 сформульована загальна постановка задачі.

В розділі 1.2 наведено розв'язок задачі обтікання тіл випуклої форми вільномолекулярним потоком. Набігаючий потік прийнято рівноважним з максвелівською функцією розподілу молекул за швидкостями. На поверхні тіла схема взаємодії дифузно-зеркальна. В будь-якій точці $A(\vec{r})$ вибраної розрахункової області поля течії навколо тіла функція розподілу являється двопоточною:

$$f[A(\vec{r})] = \begin{cases} f_{\infty}, & \vec{v} \in 4\pi - \Omega_r \\ f_r, & \vec{v} \in \Omega_r \end{cases} \quad (1)$$

Тут f_∞ - функція розподілу частинок наближаючих, а f_r - функція розподілу відбитих від поверхні тіла частинок газу; Ω_r - тілесний кут, під яким тіло, що обтікається видно з точки $A(\vec{r})$ розрахункового поля.

Газодинамічні параметри в точці з радіус-вектором \vec{r} навколо тіла - концентрація $n(\vec{r})$, швидкість $\vec{V}(\vec{r})$ і температура $T(\vec{r})$ визначаються через моменти функції розподілу співвідношеннями:

$$n(\vec{r}) = n_\infty + \int_{\Omega_r} d\Omega_r \int_0^\infty (f_r - f_\infty) v^2 dv, \quad (2)$$

$$n(\vec{r})\vec{V}(\vec{r}) = n_\infty\vec{U}_\infty + \int_{\Omega_r} d\Omega_r \int_0^\infty (f_r - f_\infty) \vec{v} v^2 dv, \quad (3)$$

$$\frac{3}{2} kT(\vec{r})n(\vec{r}) = \int_{4\pi - \Omega_r} d\Omega_r \int_0^\infty \frac{m}{2} [\vec{v} - \vec{V}(\vec{r})]^2 f_\infty v^2 dv + \quad (4)$$

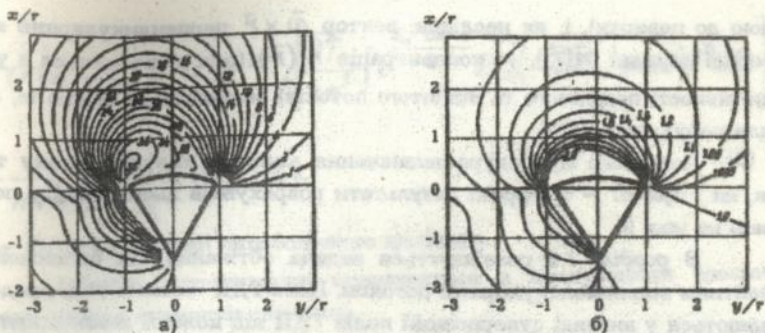
$$+ \int_{\Omega_r} d\Omega_r \int_0^\infty \frac{m}{2} [\vec{v} - \vec{V}(\vec{r})]^2 f_r v^2 dv.$$

Уникнути труднощів визначення області інтегрування в (2-4) вдається при переході від інтегрування по тілесному куту до інтегрування по поверхні тіла. В цьому разі область інтегрування визначається умовою видимості точки на поверхні тіла з розрахункової точки поля і легко визначається в процесі чисельного інтегрування по елементарних площадках поверхні тіла.

На мал. 1 наведено приклад розрахунку ГДП випуклого тіла при його асиметричному обтіканні.

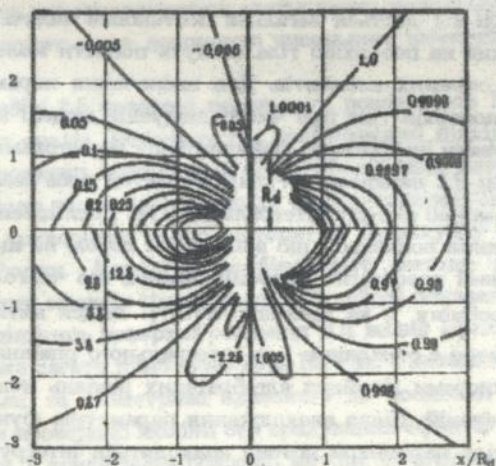
В розділі 1.3 розв'язується задача обтікання випуклих тіл, які обертаються навколо осі симетрії з постійною кутовою швидкістю $\vec{\omega}$.

Вважається, що взаємодія молекул газу з поверхнею відповідає дзеркально-дифузній моделі. В цьому разі функція розподілу молекул наближаючого та дзеркально відбитого потоку, а також область інтегрування Ω_r , будуть такими ж, як при $\vec{\omega} = 0$. Молекули, що відбиваються дифузно, здобувають додаткову швидкість, обумовлену обертанням тіла. Оскільки лінійна швидкість обертання в кожній точці тіла є дотич-



Мал. 1. Ізолінії ГДП течії навколо сегментально-конічного гарячого тіла (а - температура; б - густина потоку). На цьому і подальших малюнках розрахункові параметри віднесено до їх значень у набігаючому неворушному потоці.

y/R_d



Мал. 2. Лінії рівних концентрацій (права напівплощина) та вісьової компоненти швидкості (ліва напівплощина) навколо диска ($R_d=0.1\text{м}$), що обертається у нерухомому розрідженому повітрі. Верхня напівплощина - при $\omega=100\text{ об/с}$, нижня - при $\omega=1000\text{ об/с}$.

ною до поверхні, і, як наслідок, вектор $\vec{\omega} \times \vec{r}$ перпендикулярний векторові нормалі $\vec{n}(\vec{r})$, то концентрація $n_r(\vec{r})$ (яка визначається з умови рівності падаючого та відбитого потоків) залишається такою ж, як і для нерухомого тіла.

Подальша процедура визначення макропараметрів потоку така ж, як і при $\vec{\omega} = 0$. Окремі результати розрахунків цього розділу показані на мал. 2.

В розділі 1.4 розв'язується задача обтікання тіл багатокомпонентним вільномолекулярним потоком. Поля ГДП навколо тіла представляються у вигляді суперпозиції полів ГДП від кожної компоненти набігаючого потоку. Вважається, що функція розподілу i -тої компоненти є максвеловською. Алгоритм розрахунку для кожної з компонент аналогічний розглянутому в розділі 1.2.

Глава 2 присвячена розрахункам ГДП навколо тіл складної форми.

В розділі 2.1 дається загальна постановка задачі. Характерним для неї є те, що на поверхню тіла можуть попасти молекули перевідбиті від його окремих елементів. Для визначення параметрів функції розподілу на поверхні тіла при чисто дифузійній моделі взаємодії необхідно розв'язувати інтегральне рівняння типу Фредгольма II роду.

В розділі 2.2 наведено регулярний метод розв'язання цього рівняння за допомогою методу інтегральних сум. Дослідження ядра інтегрального рівняння показало, що воно являє собою не що інше, як локальний кутовий коефіцієнт випромінювання, що часто вживається в задачах теплообміну, і, як наслідок $\in [0,1]$. Звідси витікає, що інтегральний оператор є стисливим і до інтегрального рівняння та апроксимуючої його системи лінійних алгебраїчних рівнянь можна застосовувати метод ітерацій. Після знаходження параметрів функції розподілу на поверхні тіла параметри потоку знаходяться інтегруванням по поверхні тіла виразів:

$$n(\vec{r}) = n_{\infty} \left[1 - \frac{e^{-s_{\infty}^2}}{\sqrt{2\pi^3}} \int e^{\frac{s_{\infty}^2 \cos^2 \theta}{2}} D_{-3}(-\sqrt{2} s_{\infty} \cos \theta) d\Omega \right] + \frac{1}{4\pi} \int_{\Omega} n_r d\Omega, \quad (5)$$

$$\vec{V}(\vec{r}) = \frac{n_\infty}{n(\vec{r})} \left[\vec{V}_\infty - 3e^{-s_\infty^2} \sqrt{\frac{RT_\infty}{2\pi^3}} \int e^{\frac{s_\infty^2 \cos^2 \theta}{2}} D_{-4}(-\sqrt{2}S_\infty \cos \theta) \vec{v}^0 d\Omega \right] + \frac{1}{n(\vec{r})} \sqrt{\frac{R}{2\pi^3}} \int_{\Omega_r} n_r \sqrt{T_r} \vec{v}^0 d\Omega, \quad (6)$$

де $D_t(x)$ - функції параболічного циліндра.

Область інтегрування визначається з врахуванням взаємного екранування елементів поверхні.

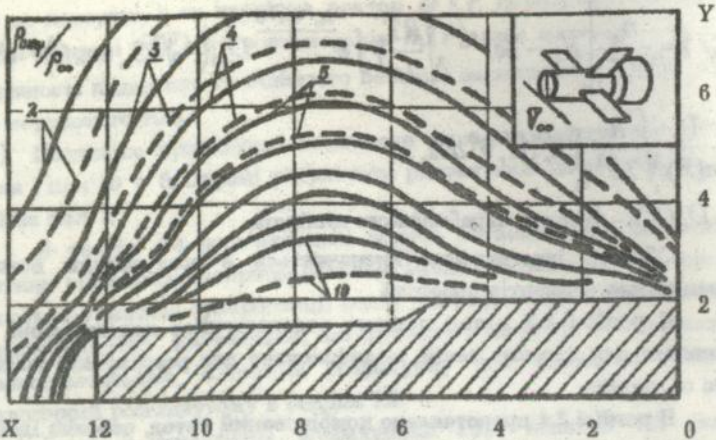
В розділі 2.3 метод прямого статистичного моделювання, який вживався для плоских течій, модифіковано для розрахунків тривимірного обтікання.

В розділі 2.4 представлено комбінований метод, основна ідея якого полягає в тому, що для визначення параметрів функції розподілу на поверхні тіла використовується статистичне моделювання, а ГДП в полі течії знаходяться за допомогою чисельного інтегрування (5,6) по поверхні тіла.

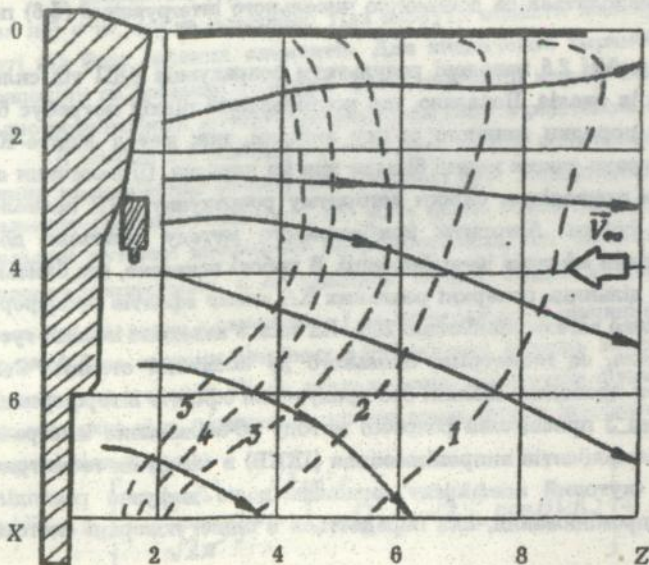
В розділі 2.5 наведені результати розрахунків ГДП тіл складної форми та їх аналіз. Показано, що комбінований підхід потребує більш ніж на 2 порядки меншого об'єму вибірки, ніж метод Монте-Карло. Часові затрати також менші більше ніж на порядок. Ці величини стали основними критеріями оцінки алгоритму розрахунку ГДП навколо тіл складної форми. Алгоритм комбінованого методу дозволяє досліджувати вплив ефектів інтерференції. В роботі показано, що близько до вигнутих ділянок поверхні реальних КА вплив ефектів інтерференції на ГДП може сягати приблизно 20%. На мал. 3 наведено ізолінії густини навколо тіла, за геометрією близького до космічної станції "Салют" (пунктиром проведено ізолінії без врахування ефектів інтерференції).

Глава 3 присвячена розробці методу обчислювання інтегральних кутових коефіцієнтів випромінювання (ІККВ) в складних геометричних системах (кутовий коефіцієнт визначає долю дифузно розподіленої енергії випромінювання, яка передається з однієї поверхні системи до другої).

Постановка задачі дається в розділі 3.1.



Мал. 3. Вплив ефектів інтерференції на концентрацію частинок, що відбиті від поверхні ОС "Салют". Пунктиром показані лінії рівних концентрацій без врахування інтерференції.



Мал. 4. Лінії току частинок газівідділення з поверхні КА "Космос-2007". Ізохори частинок атмосфери, відбитих від його поверхні, показані пунктиром.

Алгоритм чисельного інтегрування для розрахунків ІККВ представлено в розділі 3.2. Чисельне чотириохрватне інтегрування реалізується з врахуванням ефектів затінення окремих ділянок поверхні тіла. Похибки такого алгоритму розрахунків ІККВ обумовлені: заміною інтеграла кінечною сумою; неточністю визначення границь інтегрування; округленням обчислень. Чисельні дослідження показали, що при збільшенні числа елементарних площадок дві перші похибки зменшуються, однак це призводить до різкого збільшення складових в інтегральній сумі, і, внаслідок цього збільшується третя. Слід відзначити, що при розрахунках ІККВ поверхонь які перетинаються між собою з'являються деякі локальні особливості ($r \rightarrow 0$), які можуть стати джерелами додаткових досить значних похибок. Щоб запобігти цьому, в складних геометричних системах пропонується застосовувати метод статистичного моделювання.

Використання статистичних методів для таких задач розглянуто в розділі 3.3. При обчисленні ІККВ пропонується досить простий алгоритм, який базується на безпосередніх підрахунках частини випромінювання з поверхні S_i на поверхню S_j . Передбачається, що вся поверхня складається з дифузних точечних випромінювачів однакової інтенсивності. Якщо на поверхні S_i рівномірно розподілено N_i випромінювачів, а з кожного з них виходить деяке кінцеве K_i число променів, то повне випромінювання поверхні S_i за одиницю часу буде $M = N_i K_i$ променів. Приблизне значення ІККВ можна виразити співвідношенням:

$$\varphi_{ij} \approx \frac{m_j}{N_j K_i}, \quad (7)$$

де m_j - кількість променів, що попали на поверхню S_j . Оцінка відносних похибок такого моделювання ІККВ, контролюється в процесі розрахунку.

В розділі 3.4 наведено опис комплексу програм "ЛУЧ" для розрахунків ІККВ, приклади розрахунків ІККВ і рекомендації по використанню розробленого програмного забезпечення.

В главі 4 описана математична модель розрахунку процесів масо-переносу навколо КА з газовиділяючими поверхнями.

Розділ 4.1 присвячено визначенню ГДП навколо тіл складної форми з газовиділяючими поверхнями. У довільній точці розрахункової області навколо тіла ГДП представляються у вигляді суперпозиції трьох потоків частинок: набігаючого, відбитого та генерованого самою поверхнею. Методи розрахунку перших двох детально описані в главах 1 та 2. Для частинок газовиділення функція розподілу вважається максвеловською і має вигляд:

$$f_g = n_g \left(\frac{m_g}{2\pi kT_r} \right) \exp \left(- \frac{m_g U^2}{2kT_r} \right), \quad (8)$$

де n_g - параметр, пов'язаний зі швидкістю дегазації частинок з поверхні виразом:

$$n_g(\vec{r}) = g_w(\vec{r}) \sqrt{\frac{kT_r(\vec{r})}{2\pi m_g}}. \quad (9)$$

Складові ГДП від частинок газовиділення визначаються з виразів:

$$n_3(\vec{r}) = \int_{\Omega_g} d\Omega \int_0^{\infty} f_g U^2 dU = \int_{\Omega_g} \frac{n_g(\vec{r})}{4\pi} d\Omega, \quad (10)$$

$$n_3(\vec{r}) \vec{V}_3(\vec{r}) = \int_{\Omega_g} d\Omega \int_0^{\infty} \vec{U} f_g U^2 dU = \int_{\Omega_g} n_g(\vec{r}_s) \sqrt{\frac{R_g T_r(\vec{r}_s)}{2\pi^3}} \vec{U}^0 d\Omega. \quad (11)$$

Для випуклих тіл інтегрування (10,11) з врахуванням (9) дає розв'язання задачі в цілому, а для тіл складної форми необхідно враховувати ефекти інтерференції. В цьому разі n_g залежить від ефективної швидкості газовиділення для елемента поверхні з радіус-вектором \vec{r} . Розрахунки ГДП потоку частинок газовиділення реалізовано з застосуванням комбінованого підходу (глава 2) з деякою модифікацією.

На мал. 4 наведені результати розрахунку комбінованим методом параметрів ВЗА КА "Космос-2007". Суцільними лініями зображено лінії току відбитих від поверхні КА частинок, а пунктирними - їх ізохори частинок газовиділення.

При потребі швидких розрахунків процесів переносу між "дифузними" поверхнями пропонується застосовувати метод ІККВ (глава 3).

В розділі 4.2 наведено розв'язок задачі знаходження параметрів ВЗА КА, який обтікається гіперзвуковим газопиловим потоком. Задача вирішувалась для фізичних умов під час прольоту станції "Вега" поблизу комети Галлея. Використовувалась фізична модель атмосфери комети і фізична модель взаємодії пилових частинок з поверхнею станції, розроблені в Інституті космічних досліджень АН СРСР.

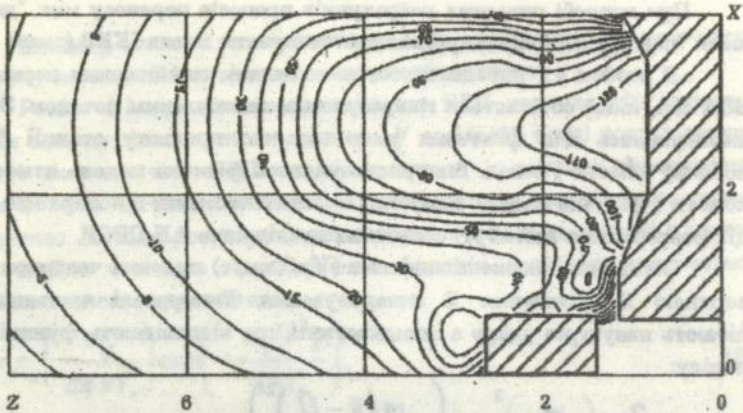
Зіткнення високошвидкісних ($V \sim 80 \text{ км/с}$) пилових частинок з поверхнею КА викликає її випаровування. Випарувані частинки вилітають нааустріч удару з швидкостями, що відповідають функції розподілу:

$$f_e(\vec{v}) = \frac{2}{\pi} J_e \left(\frac{m_e}{2kT_e} \right)^2 \exp \left(- \frac{m_e (\vec{v} - \vec{U}_e)^2}{2kT_e} \right), \quad (12)$$

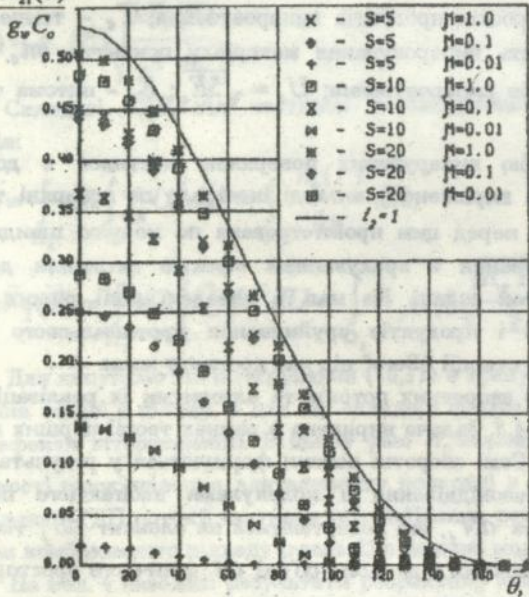
де J_e - масовий розхід продуктів випаровування; T_e - температура, при якій проходить випаровування матеріалу покриття; m_e - маса частинок продуктів випаровування; $U_e = \sqrt{5E_e}$; E_e - питома теплота випаровування.

Концентрацію випаруваних поверхнею частинок в довільній точці навколо КА виражено у вигляді інтегралу по поверхні тіла від функції (12), яка перед цим проінтегрована по модулю швидкості v . Чисельне інтегрування з врахуванням ефектів затінення дозволяє одержати розв'язок задачі. На мал. 5 наведені лінії рівних густин газових частинок і продуктів зруйнування протипильового екрану навколо космічної станції "Вега" під час прольоту коми.

Розрахунки зворотних потоків та алгоритми їх реалізації представлені в розділі 4.3. Задача вирішена в рамках теорії перших молекулярних зіткнень. Самі зворотні потоки формуються у результаті зіткнень частинок газівідділення з молекулами набігаючого потоку. Кількість частинок dN_j , які повертаються на елемент dS_j тіла після зіткнення з набігаючими в деякому об'ємі $d\tau$ фізичного простору можна представити у вигляді:



Мал. 5. Розподіл густини газових частинок навколо КА "Вега" під впливом гіперзвукового сильно розрідженого газопилового набігаючого потоку.

$$N_{21}(\theta)$$


Мал. 6. Розподіл зворотних потоків частинок газорозділення по поверхні сфери при різних співвідношеннях мас та швидкостей частинок, що зіткнуються. Суцільна лінія відповідає випадку нерухомих частинок газорозділення.

$$dN_j = n_1 n_2 g_{21} \left(\frac{d\sigma}{dS_j} \right) d\tau, \quad (13)$$

де $n_1 = f_1 d\vec{V}_1$, $n_2 = f_2 d\vec{V}_2$ - концентрації набігаючого потоку та частинок газівідділення в dt ; $g_{21} = |\vec{U}_2 - \vec{U}_1|$ - відносна швидкість зіткнення.

Диференційний перетин розсіювання для молекул-пружних сфер в системі координат, що зв'язана з тілом мас вигляд:

$$d\sigma = W(\gamma) d\omega = \frac{\sigma_0}{4\pi} \left\{ \pm 2t_k \cos \gamma + \frac{1 + t_k^2 \cos 2\gamma}{(1 - t_k^2 \sin^2 \gamma)^{1/2}} \right\} d\omega. \quad (14)$$

Тут $t_k = \frac{m_k(m_1 + m_2)}{m_1 m_2} |\vec{g}_c| / |\vec{g}_{21}|$; σ_0 - повний перетин розсіювання;

γ - кут між вектором швидкості частинки після зіткнення, яка рухається до тіла та вектором швидкості центру мас \vec{g}_c . Знаки "+" та "-" відповідають двом можливим напрямкам вектора \vec{g}_{21} при одному і тому ж куті γ . Сумарні зворотні потоки продуктів газівідділення на відповідні ділянки поверхні тіла визначаються шляхом інтегрування виразу (13) по просторах швидкостей \vec{U}_1 та \vec{U}_2 , поверхні S і об'єму τ прилягаючого до тіла. На мал. 6 наведено результати розрахунків кутового розподілу зворотних потоків на сферу в рівномірному газівідділенні за допомогою моделі "перших молекулярних зіткнень" для умов гіпертеплового обтікання. Концентрація та масова швидкість частинок газівідділення визначалась за формулами, які отримано у результаті аналітичного розв'язку даної задачі. Зворотні потоки віднесені до g_{∞} та комплексу $C_0 = \left(\frac{m_g}{m_{\infty}} \right)^{1/2} \left(\frac{T_{\infty}}{T_r} \right)^{1/2} \frac{S_{\infty} \sigma_{12}}{Kn_{\infty} \sigma_{\infty}}$.

Результати розрахунків зворотних потоків з застосуванням "перших молекулярних зіткнень" добре узгоджуються з результатами інших авторів.

В додатку вирішується задача визначення впливу нерівномірності газівідділення з поверхні КА на параметри його руху.

III. ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Створена розрахункова модель формування власної зовнішньої атмосфери навколо КА, що рухається в багатокомпонентному потоці верхньої атмосфери Землі. Розроблене методологічне, алгоритмічне і програмне забезпечення для моделювання процесів масопереносу навколо КА складної форми.

2. Побудовані алгоритми розв'язання тривимірних задач по розрахунку вільномолекулярних полів течій навколо тіл складної форми з врахуванням ефектів інтерференції, обертання та взаємного затінення елементів конструкції, що поєднують основні переваги методу Монте-Карло і регулярних методів. Запропонований спосіб зниження дисперсії, який базується на виділенні у якості головної частини процедури чисельного інтегрування основних моментів функції розподілу біля тіла з врахуванням взаємного затінення окремих елементів конструкції.

За допомогою чисельних експериментів показано, що ця методика має ряд переваг:

- при одному і тому ж об'ємі вибірки похибки визначення концентрації на поверхні тіла менші від тих, що отримані із застосуванням статистичних методів на порядок;

- об'єм необхідної пам'яті ЕОМ $\sim O(N)$, тоді як регулярні методи вимагають $\sim O(N^2)$;

- затрати часу на отримання результатів з заданою похибкою розрахунків значно менші ніж при застосуванні регулярних методів для розв'язку рівняння Фредгольма.

Розроблений алгоритм та створене програмне забезпечення щодо застосування методу інтегральних кутових коефіцієнтів випромінювання (ІККВ) для врахування ефектів інтерференції при обтіканні тіл складної форми вільномолекулярним потоком розрідженого газу.

Розвинуті різні підходи (чисельного інтегрування та імітаційного статистичного моделювання) до розрахунків ІККВ елементів складних геометричних систем. Досліджені джерела похибок обчислення ІККВ, та виконана їх оцінка.

3. Розроблений алгоритм та виконані дослідження зворотних потоків частинок газовідділення зовнішніх покриттів КА, розсіяних на багатокомпонентному набігаючому потоці верхньої атмосфери Землі. По-

казано, що теорія "перших молекулярних зіткнень" дає правильні результати, які погоджуються з результатами розрахунків, що отримані більш складними методами. При цьому необхідно коректно розраховувати ГДП вільномолекулярної течії, а диференційний перетин розсіяння записати у формі, яка враховує різницю у швидкостях та масах частинок-партнерів по зіткненням.

4. Приведена оцінка впливу нерівномірності газовідділення з поверхні КА на параметри його руху при коректних розрахунках сил негравітаційного походження.

5. Створене програмне забезпечення для дослідження процесів масопереносу навколо космічних апаратів різного призначення, яке дозволяє виконувати як оціночні (швидкі) так і точні розрахунки необхідних параметрів

6. Проведені дослідження параметрів ВЗА КА "Вега", які були використані для забезпечення надійного функціонування комплексу наукової апаратури у міжнародному проекті "Венера-Галлей".

Основні результати виконаних досліджень знайшли відображення в наступних публікаціях:

1. Васс В.П., Бразинский В.И. Расчет газодинамических параметров в окрестности тел, обтекаемых свободномолекулярным потоком // Изв. АН СССР. Механ. жидкости и газа. 1982. N 4.- С.177-180.

2. Васс В.П., Бразинский В.И. Расчет параметров разреженного газа, возмущенного симметрично вращающимся в нем телом // Аэродинамика и нестационарный тепломассообмен.- Киев: Наук.думка, 1983.- С.58-62.

3. Бразинский В.И. Расчет параметров собственной атмосферы в окрестности летательных аппаратов сложной формы// Прикл. вопр. аэродинамики летательных аппаратов.-Киев: Наук. думка, 1984.-С.50-54.

4. Абрамовская М.Г., Васс В.П., Бразинский В.И. Влияние состава атмосферы на аэрогазодинамические характеристики движущихся в ней космических аппаратов // Тр. VII Научных чтений по космонавтике (Вопр. проектирования летательных аппаратов).- М., 1984.- С.51-57.

Автором використана основа алгоритму врахування молекулярного складу атмосфери, створеного М.Г. Абрамовською для розрахунків силових та моментних характеристик КА, при створенні алгоритму

чисельного моделювання газодинамічних параметрів в полі течії навколо апарату.

5. Басс В.П., Бразинский В.И. Влияние параметров собственной атмосферы на функционирование летательных аппаратов // Наблюдения искусственных небесных тел. - М., 1984, N 81.- С.87-99.

6. Басс В.П., Бразинский В.И., Карягин В.П., Ковтуненко В.М. и др. Расчет газовой обстановки около космической станции "Вега" во время пролета комы // Тр. VIII Всесоюз. конф. по динамике разреженных газов (Аэродинамика, тепло- и массообмен в разреженном газе). -М., 1987.- С.3-7.

Методичне, програмне забезпечення та чисельні дослідження виконані автором, а інтерпретація результатів та їх використання при аналізі приладових сигналів зі станції "Вега" виконані співробітниками НВО ім. Лавочкина.

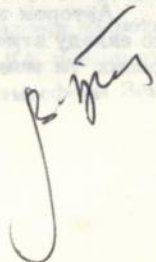
7. Басс В.П., Бразинский В.И. Анализ методов расчета свободномолекулярных полей течений // Прикладные вопросы аэрогазодинамики.- Киев: Наук.думка, 1987.- С.10-16.

8. Басс В.П., Бразинский В.И. Численные алгоритмы для расчета процессов массопереноса в сильно разреженном газе // Журн. выч. матем. и матем. физики.- 1988.- Т.28, N 7.- С. 1078-1093.

9. Постановка и реализация натуральных экспериментов по исследованию процессов массопереноса в окрестности ИСЗ серии "Космос" /Басс В.П., Бразинский В.И., Пилипенко А.П. и др.// Методы исследования гиперзвуковых летательных аппаратов (Сб. докл. ежегодной научной школы-семинара ЦАГИ "Механика жидкости и газа" 25.02.-01.03.1992 г.).-М: Изд-во ЦАГИ, 1994, ч. 5.- С. 8.1-8.17.

Авторів належить методичне та програмне забезпечення для обробки експериментальних та натурних даних, одержаних за допомогою приладів, створених А.П.Пилипенком та Л.Л.Солодовником.

В роботах написаних в співавторстві з науковим керівником В.П.Бассом формулювання науково-технічних проблем, критерії вибору фізико-математичних моделей та аналіз одержаних результатів виконані спільно. Розрахункові методи та математичні моделі, алгоритмічне і програмне забезпечення, чисельні дослідження процесів масопереносу виконані автором.



АННОТАЦИЯ

Бразинский В.И. Численное моделирование процессов массопереноса в окрестности тел, движущихся в верхних слоях атмосферы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - механика жидкостей, газа и плазмы, Днепропетровский государственный университет, Днепропетровск, 1996.

Диссертационная работа посвящена разработке методик, алгоритмов и программных средств для моделирования процессов массопереноса в окрестности космических аппаратов различной формы. Представлено методологическое и программное обеспечение для решения трехмерных задач по расчету течений сильно разреженного газа в окрестности тел сложной формы с газовыделяющими поверхностями. Приведены результаты исследований особенностей формирования газовой компоненты собственной внешней атмосферы под влиянием различных начальных условий в набегающем потоке и на поверхности аппарата.

ABSTRACT

Brazinsky V.I. Numerical simulation of the mass transfer near the bodies, moving in the upper atmosphere. Dissertation, presented for obtaining the degree of the candidate of science (Physics and Mathematics) on a speciality 01.02.05 - Fluid, Gas and Plasma Mechanics, Dnepropetrovsk State University, Dnepropetrovsk, 1996.

The dissertation is devoted to development of techniques, algorithms and software for the simulation of the mass transfer in the vicinity of space crafts of the various configurations. Methodology and software for the solution of 3D problems on analysis of strongly rarefied gas flows in the vicinity of the complex configuration bodies with outgassing surfaces is submitted. Results of research of the gas component of own external atmosphere formation under influence of the various entry conditions in an ambient flow and on a surface of a vehicle are indicated.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: чисельне моделювання, розріджений газ, космічний апарат, власна зовнішня атмосфера.

438199

Ав 35.389

Підп. до друку 30.07.96. Формат 60x84 1/16. Папір пис. №1
Умовн. друк. арк. 0.95. Обл. вид. арк. 1.0. Тир. 100.
Зам. 1685.

Друкарня Дніпропетровського державного університету,
Дніпропетровськ, вул. Козакова, 46.