УДК 551.5

Грушевський О.М., Міщенко Н.М., Пишняк Д.В.
Одеський національний університет імені І. І. Мечникова, м. Одеса, Україна
Національний антарктичний науковий центр, м. Київ, Україна

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЄКТОРІЙ ПОВІТРЯНИХ ЧАСТИНОК НА ФІКСОВАНИХ РІВНЯХ ЗА ДОПОМОГОЮ СТАТИЧНО УРІВНОВАЖЕНИХ КУЛЬ

Для окремих завдань прикладного характеру існує необхідність визначення траєкторії руху частинок повітря на деякому фіксованому рівні. Розв'язання такої задачі, очевидно, бути мати дві складові – розробка протоколу наповнення кулі інертним газом у обсязі, що забезпечуватиме її (та супутнього навантаження) фіксацію на певній висоті та попередній розрахунок траєкторії руху кулі з урахуванням поточної температурно-вітрової стратифікації атмосфери. Розв'язання цієї задачі розглянемо на прикладі використання гелію у якості інертного газу. Нехай тиск у 40-літровому балоні, де він зберігається, становить, наприклад, 14,7 МПа. Для розрахунку кількості молів гелію при температурі T = 298 К у такому балоні використаємо рівняння

$$pV = \nu R_c T \Rightarrow \nu = \frac{pV}{R_c T} = \frac{14{,}7 \cdot 10^6 \cdot 0{,}04}{8{,}314 \cdot 298} = 237{,}3$$

де ν – кількість молів гелію у одному балоні.

Враховуючи той факт, що об'єм кулі може бути різним, доцільно, з практичної точки зору, визначити кількість куль, на наповнення яких вистачає одного балону. Встановлюємо, що з одного 40-літрового балону ми можемо наповнити 3,5 кулі, тобто на одну кулю припадає 67,8 молів (237,33/3,5 = 67,8) гелію. Коректність розрахунків перевіряється шляхом розрахунку діаметру кулі і його співставленням з результатами його заміру.

$$V_0 = \nu_0 \cdot V_m = 67{,}8 \cdot 22{,}4 = 1518 л \ ,$$

де V_m = const – молярний об'єм.

Одержаний розрахунковим шляхом діаметр кулі (1,43 м) через співвідношення з її об'ємом узгоджується з результатами його заміру (≈1,4 м). Розрахунок маси гелію у кулі здійснюється за формулою

$$m_0 = \nu_0 \cdot M = 67{,}8 \cdot 4{,}003 = 271{,}4 г,$$

де M – молярна маса гелію.

Наступним етапом є розрахунок нульової плавучості кулі на певній висоті. Для цього скористаємося рівнянням

$$mg = (\rho_п - \rho_г) \cdot V_к, \qquad (1)$$

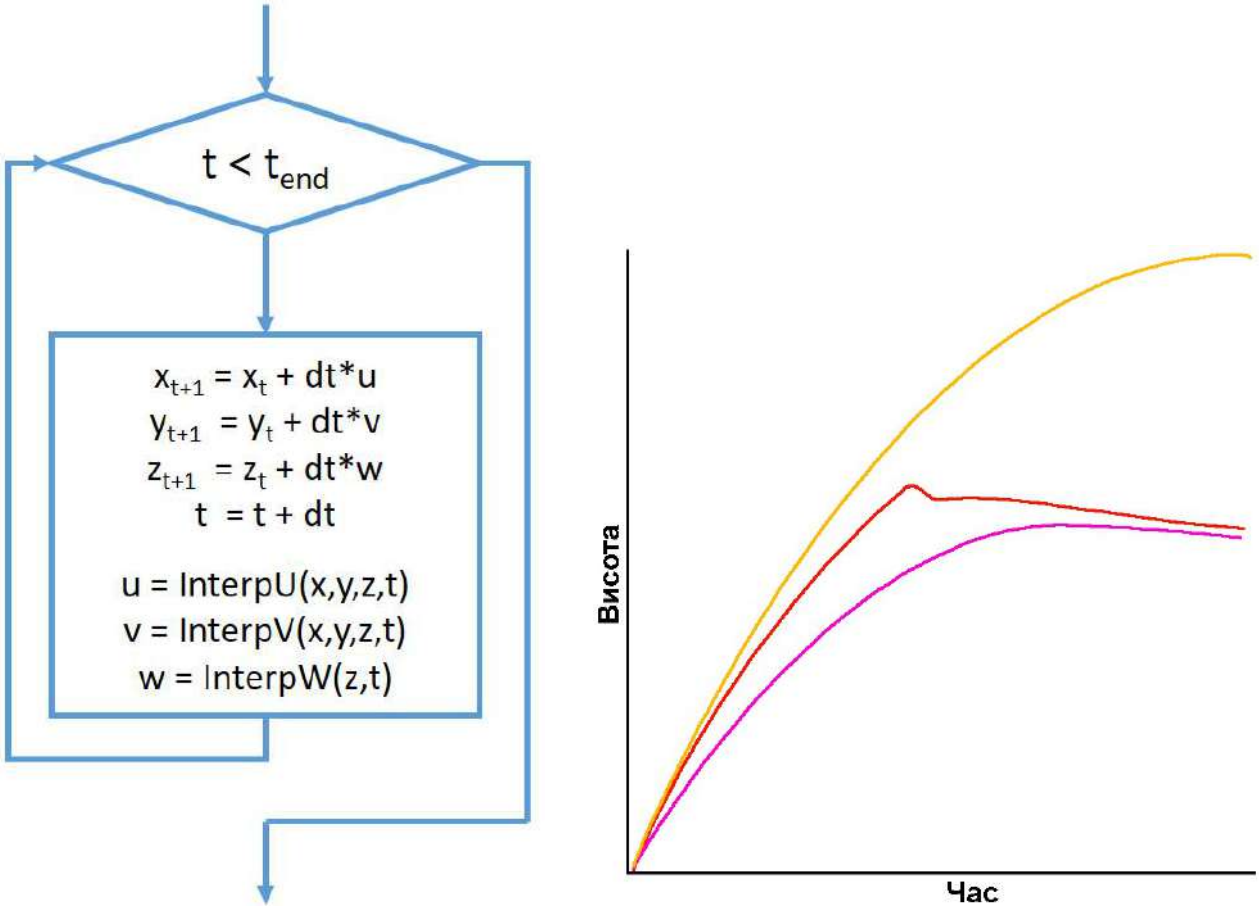
де $\rho_п$ і $\rho_г$ – густина повітря і гелію відповідно; $V_к$ – об'єм кулі.

Аналіз рівняння (1) показує, що досягнення урівноваженості сили тяжіння і сили Архімеда матиме місце лише у випадку, коли об'єм кулі, значення якого постійно змінюватиметься за рахунок зміни тиску у навколишньому середовищі, буде зафіксований. Цю проблему вирішує використання сітки, яка зафіксує об'єм кулі, і масу якої нам також потрібно врахувати у лівій частині рівняння разом з масами інших складових конструкції (оболонки, відбивача, сітки тощо). За умови застосування до кулі умови адіабатичності ($\rho_г$ = const), завдання її фіксації на певній висоті полягатиме у розрахунку густини повітря на цій висоті (через рівняння стану), з урахуванням поточної стратифікації атмосфери, і

додаванням до конструкції такої ваги, при якій умова (1) виконуватиметься. У якості вихідних даних можуть використовуватися дані радіозондування або модельні дані (у разі необхідності збільшення завчасності процесу підготовки).

Друга частина може вирішуватися двома способами. Перший, спрощений, полягає у побудові годографу вітру на бланку векторної діаграми у полярній системі координат «азимут-швидкість». При цьому необхідно враховувати час підйому кулі до заданого рівня і, за необхідності, коригувати координати вузла, з якого використовуються дані про вітер, через врахування горизонтальної швидкості кулі. Побудова результуючого вектору дозволяє визначити кінцевий район виходу кулі.

У іншому способі для апроксимації траєкторії кулі, що вільно здіймається, використаний метод побудови траєкторії частинки повітря з додатковою дискретизацією у часі та просторі, придатний для сіткових метеорологічних даних, які генеруються типовими моделями атмосфери (наприклад, GFS). У методі час дискретизації задається довільно (рис. 1), в межах хвилин, та впливає на точність і швидкість розрахунку. Для розрахунку траєкторії кулі замість вертикальної швидкості вітру застосовується її власна вертикальна швидкість, яка може бути описана функціонально, алгоритмічно або навіть довільно (графічно), виходячи з прямих експериментальних (розрахункових) даних.



а) *б*)

Рис.1. **Фрагмент реалізації алгоритму розрахунку траєкторії руху кулі з додатковою дискретизацією у часі та просторі (*а*)**

x, *y*, *z* – метричні координати кулі у просторі;
u, *v*, *w* – компоненти швидкості вітру для кулі;
U, V, W – вхідні масиви даних компонент швидкості вітру;
dt – крок дискретної апроксимації у часі; *t* – відлік часу.