

УДК 539.3

Іванченко Г.М., канд. техн. наук,
Голуб О.О.

КІНЕМАТИКА СМЕРЧУ І ЙОГО ВЗАЄМОДІЯ З ПОВЕРХНЯМИ

Смерч – вихор атмосферного повітря, який при швидкісному обертанні та поступальному русі на своєму шляху завдає значних пошкоджень легким спорудам. Для прогнозування динамічного впливу повітряного потоку на конструкції і врахування його на стадії проектування споруд необхідна ефективна динамічна модель цього явища. Побудові такої моделі передують дослідження кінематичних властивостей смерчового вихору.

Існує декілька моделей смерчу для визначення його кінематичних характеристик. Найбільш оптимальною та простою моделлю є стокова, яка використовується при вивченні стоку рідин, адже у смерчу, як показують експериментальні дослідження в газодинамічних камерах, виникають аналогічні явища закручування повітря [1].

Газодинамічна структура смерчу розглядається в ідеалізованих умовах. Смерч моделюється закрученим потоком атмосферного повітря з віссю симетрії, перпендикулярною поверхні землі. Висота потоку – від грозової хмари, у якому він зароджується, до деякої поверхні, розташованої над землею й паралельній її обрію. Дана умова дозволяє аналітично виключати вплив на динамічні процеси смерчу маси води та твердих предметів, які залучаються до обертового газового потоку при досягненні ним поверхні землі. Також у найпростішій моделі не враховуються зовнішні впливи на смерч рухомих повітряних мас, які переміщуються в різних напрямках („вітровий” вплив). На рис.1 показана газодинамічна структура смерчу, в якій можна виділити три області плин: 1 – приосьову („ядро” смерчу), 2 – центральну („каскад”), 3 – периферійну („стік”). В основу структури покладений аналіз свідчень численних очевидців цього дивного і загадкового явища природи великої руйнівної сили, а також теоретичних та експериментальних робіт із закручених потоків рідин і газів, виконаних науковцями.

При формуванні смерчу між зовнішньою атмосферою та приосьовою областю виникає перепад питомої потенційної енергії тиску. Крім того, за рахунок внутрішнього тертя, до обертового руху повітря приосьової області залучається сусіднє їй атмосферне повітря, що обумовлює утворення обертового осесиметричного потоку атмосферного повітря зі

швидкістю в радіальному напрямі до приосьової області V_r . Надходження до центральної частини смерчу мас повітря компенсується його витратою – в центральній частині утворюється обертовий потік атмосферного повітря, у якому має місце рух часток повітря догори з осьовою швидкістю V_z – у напрямку зменшення атмосферного тиску. Таким чином навколо приосьової області – частини грозової хмари – утворюється закручений осесиметричний обертовий потік атмосферного повітря. Частина потоку, яка характеризується в основному радіальною V_r та круговою V_ϕ компонентами вектора швидкості, будемо відносити до периферійної області смерчу. Вона невидима, що є причиною відсутності опису її в науково-популярній літературі. Частина потоку, що характеризується в основному осьовою V_z й круговою V_ϕ компонентами вектора швидкості, будемо відносити до центральної області смерчу (рис. 1). По досягненні смерчем поверхні землі в його центральну область утягуються різні предмети й вона стає видимою. У науково-популярній літературі вона називається „каскадом”.

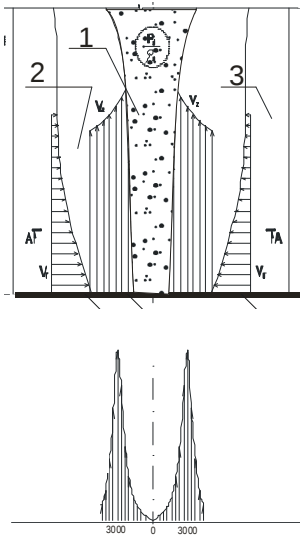


Рис. 1 Схема вертикального розрізу смерчу та епіюра тиску P

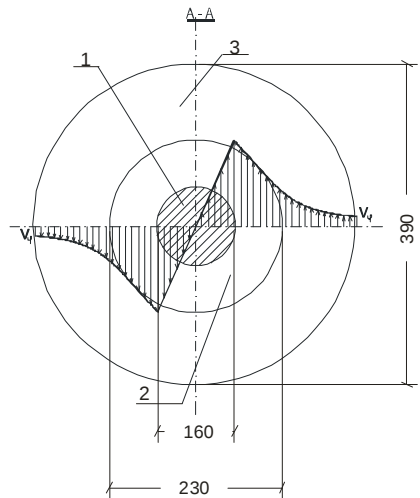


Рис. 2 Епіюра дотичної складової швидкості повітря

На рис. 2 показана епіюра швидкості повітря при обертовому русі повітря в моделі смерчу, де прийнято обертання частинок повітря приосьової області за законом твердого тіла

$$\frac{V_{\varphi}}{r} = \omega = \text{const} , \quad (1)$$

де: V_{φ} – кругова швидкість, r – поточний радіус, ω – кутова швидкість. Крім того, в приосьовій області порівнюючи із зовнішнім середовищем має місце понижений тиск.

Реальні смерчі мають приблизно такі геометричні параметри: діаметр ядра – 160 м, діаметр центральної зони – 230 м, ширина периферійної зони – 80 м. Виходячи з відомих закономірностей закручених плинів рідин і газів, можна вважати – обертний рух часток повітря, що становлять периферійну й центральну області смерчу, щодо його осі симетрії відбувається за законом сталості циркуляції швидкості [4]:

$$\frac{\Gamma}{2\pi} = V_{\varphi} r = \text{const} . \quad (2)$$

Використовуючи циліндричну систему координат r, φ, z з віссю $r = 0$ можна записати систему диференціальних рівнянь Громеки-Ламба [5] з виключенням впливу на кінематичні та динамічні параметри руху та стан в периферійній і центральній областях гравітаційної енергії при умові, що

$$g \ll \frac{V_{\varphi}^2}{r} . \quad (3)$$

Після приведення її до вигляду:

$$d \left| \frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} \right| = 2 \begin{vmatrix} dr & r d\varphi & dz \\ V_r & V_{\varphi} & V_z \\ \omega_r & \omega_{\varphi} & \omega_z \end{vmatrix} . \quad (4)$$

Тут V_r, V_{φ}, V_z – проекції вектора швидкості на осі координат, $V^2 = V_r^2 + V_{\varphi}^2 + V_z^2$, P – тиск, ρ – щільність, g – прискорення вільного падіння, V_{φ}^2/r – відцентрове прискорення.

Компоненти швидкості обертального руху:

$$\omega_r = 0,5 \left(r^{-1} \partial V_z / \partial \varphi - \partial V_{\varphi} / \partial z \right), \quad (5)$$

$$\omega_r = 0,5 \left(r^{-1} \partial V_z / \partial \varphi - \partial V_{\varphi} / \partial z \right), \quad (6)$$

$$\omega_r = 0,5 \left(r^{-1} \left(\partial (r V_{\varphi}) / \partial r - \partial V_r / \partial \varphi \right) \right). \quad (7)$$

Для дослідження кінематики закрученого потоку в периферійній і центральній областях можна виділити елемент смерчу, ширина якого на багато менша висоти смерчу, $\Delta h \ll H$ (рис. 3).

Для потенціальних потоків справедлива рівність $\omega_r = \omega_\varphi = \omega_z = 0$.

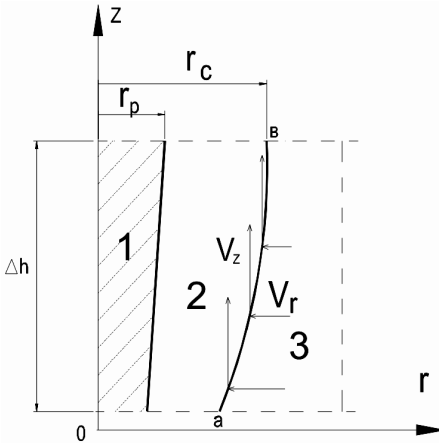


Рис. 3 Фрагмент вертикального розрізу смерчу

За умови осесиметричного потоку, $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$, маємо:

$$V_r(\varphi) = \text{const}, \quad (8)$$

$$V_\varphi(\varphi) = \text{const}, \quad (9)$$

$$V_z(\varphi) = \text{const}. \quad (10)$$

При цьому з виразів для (6) та (7) отримаємо відповідно:

$$V_\varphi(z) = \text{const}, \quad (11)$$

$$\frac{\Gamma}{2\pi} = V_\varphi r = \text{const}. \quad (12)$$

Отримані закономірності закручених потоків підтверджені експериментально іншими дослідниками [3]. Вони підтверджують, що рух потоку повітря в периферійній області смерчу характеризують компоненти швидкості V_r та V_φ , в центральній області смерчового стовпа – компоненти швидкості V_z й V_φ . Отже, у периферійній області: $V_r(z) = \text{const}$, $V_z = 0$, а у центральній області: $V_z(r) = \text{const}$ і $V_r = 0$. Звідси видно, що у закручених потенційних потоках рідини й газу перехід від радіального (V_r) руху часток до їх осевого (V_z) руху відбувається в точках сполучення даних рухів, у яких $V_z \perp V_r$. Геометричним місцем точок сполучення є лінія сполучення a-b (рис. 3).

З диференціального рівняння лінії стоку $\frac{dr}{V_r} = \frac{r d\varphi}{V_\varphi} = \frac{dz}{V_z}$ виходить, що в

периферійній області лінії стоку є логарифмічними спіралями $\frac{dr}{r} = \frac{V_r}{V_\varphi} d\varphi$. У

центральної області лінії стоку є гвинтові лінії. Дані закручені потенційні потоки відомі в механіці рідини й газу [2]. Перше складається із двох потенційних потоків – „плоский вихор” + „стік”. Друге – „плоский вихор” + „плоско-паралельний потік”. З диференціального рівняння лінії сполучення

$dz = \frac{V_z}{V_r} dr$ можна бачити, що вона є параболою. Отже, поверхня сполучення є параболічною поверхнею обертання.

Оскільки стік рідини, яка обертається ідентично руху середовища у вихровій камері, то тиск можна приблизно описати співвідношенням:

$$p = 2\rho v^2 \left(0,5 - \frac{1}{1 + (r^2/R_v)^2} \right) + C. \quad (13)$$

У ряді випадків необхідно оцінити руйнуючі фактори смерчу. Згідно (5), надлишковий тиск при ($C = 0$) на периферії смерчу при $r \rightarrow \infty$ буде $p = \rho v^2$. Цей тиск забезпечує рух середовища у вихрі, тому $p = \Delta P$. Звідси одержуємо оцінку для максимальної швидкості потоку в смерчі

$$v_{\max} = \sqrt{\Delta P / \rho}, \quad (14)$$

а навантаження на поверхню споруди визначатимуться по формулі

$$\sigma = p - p_0 = 2\Delta P. \quad (15)$$

Використовуючи приведені співвідношення можна побудувати епюру тиску смерчу на горизонтальну поверхню. Для смерчу з геометричними розмірами показаного на рис. 1, та рис. 2 в місцях максимуму тангенціальної швидкості навантаження на поверхню становить біля 3000 Па.

1. *Смольский И.Н.* Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. – Новосибирск: Наука. Сиб. отделение, 1992. 300 с.
2. *Гупта А., Лилли Д., Сайред Н.* Закрученные потоки. – М: Мир, 1987.
3. *Мельников А.П., Косоуров К.Ф., Тихоненко А.П.* Основы аэрогидромеханики. – Л.: ИЛИИГВФ, 1940. 634 с.
4. *Политов В.С., Головин А.Г.* Некоторые вопросы газодинамики закрученных потоков // Некоторые вопросы исследований вихревого эффекта и его промышленное применение: Сборник. – Куйбышев, 1974. с. 197//200.
5. *Абрамович Г.Н.* Прикладная газовая динамика. – М.: Наука, 1991. 597 с.

Поступила до редколегії 20.12.2005р.