

МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ГАЗОПРОНИКНОСТІ У МАТЕРІАЛАХ ТА ЕЛЕМЕНТАХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ СПЕЦІАЛЬНИХ СПОРУД

Розглядаються результати дослідження течії газового середовища через тріщини, що утворенні гладкою поверхнею та поверхнею регулярною шорсткою поверхнею на контактних поверхнях «метал-бетон». Модель полягає в тому, що гідравлічний опір тріщини залежить від висоти та кроку мікроповерхностей, характеру розташування їх виступів.

The article describes the results of studies of how gas environment flows through cracks formation of the flat surface and a rough surface in regular contact surfaces "metal-concrete". The model is that hydraulic crevice's resistance depends on the height and pitch of microroughnesses, the nature of the location of their protrusions.

Постановка проблеми. В даний час важливі промислові об'єкти економіки повинні відповідати встановленим вимогам щодо стійкості їх функціонування не тільки в звичайному режимі, але і в умовах надзвичайних ситуацій військового і мирного часу, як при впливі різних засобів ураження, так і при виникненні аварій техногенного характеру.

Значну роль у вирішенні проблеми стійкого функціонування промислових об'єктів у надзвичайних ситуаціях воєнного та мирного часу грають захисні споруди цивільної оборони: притулки, пункти управління, укриття резервних джерел електроенергії та інші.

Вони дозволяють у випадку впливу різноманітних вражаючих факторів знизити, а в окремих випадках і повністю виключити людські втрати, зберегти технічні та інженерні системи, що знаходяться в спорудах. Аналогічну функцію щодо захисту особового складу Збройних Сил України, техніки і озброєння виконують спеціальні фортифікаційні споруди: командні пункти, приймально-передавальні радіоцентри, пускові ракетні та космічні комплекси, укриття.

Зростання темпів створення і виробництва нових видів ракетно-ядерної, хімічної і бактеріологічної зброї, а також постійне зростання числа аварій техногенного характеру, вимагають подальшого розвитку теорії та практики забезпечення «живучості» споруд спеціального будівництва.

Досі основним матеріалом для зведення огорожувальних будівельних конструкцій спеціальних споруд є бетон. Однак, поряд з незаперечними перевагами, такими, як простота виготовлення, незначна вартість, висока міцність на стиск, він має багато недоліків: крихкість, низьку міцність при розтягуванні і вигині, значні усадочні деформації, велику газопроникність.

При існуючих сучасних фугасних засобах ураження з кумулятивними зарядами, а також при впливі на спорудження високошвидкісних ракет і бомб, створення непроникного захисного контуру герметизації в конструкціях із залізобетону є проблематичним завданням. Справа в тому, що в дрібнозернистому бетоні, що застосовується для заповнення порожнин стиків між збірними виробами, а також в бетоні на контактах з металом в місцях пропуску через стіни і покриттях металевих деталей вхідних пристроїв і інженерних комунікацій, при впливі температурних, осадкових і усадочних деформацій, виникають значні дефектні утворення у вигляді тріщин і пустот (через його низьку міцність на розтягнення), через які у внутрішній простір споруди затікає шкідливе зовнішнє газове середовище.

При недостатній стійкості захисту на деякій площі поверхні бетонних/залізобетонних конструкцій спеціальних об'єктів і фортифікаційних споруд або наявності локальних ослаблених зон (в тому числі як і тріщин) можливо пробиття конструкції при дії суббоекприпасів, унітарних і тандемних бетонобійних боеприпасів цих місць з утворенням потоку кумулятивного струменя, газоповітряного середовища.

У вітчизняному і зарубіжному будівництві фортифікації широке застосування отримала система спеціального захисту в законструктивному просторі, в яку входять протиосколочні шари і екрани. Але ця система захисту

розрахована на потужні ударні хвилі (ядерного вибуху) і звичайні боеприпаси, і не розрахована на дію суббоеприпасів, унітарних і тандем них бетонобійних боеприпасів з вибухонебезпечними і токсичними речовинами.

Як відомо, дія боеприпасів об'ємного вибуху на військові фортифікаційні споруди (ВФС) характеризується навантаженням захищаючих конструкцій і зміною стану газоповітряного середовища основною бойовою частиною (ОБЧ) у внутрішньому об'ємі споруд, що може привести до зниження або повної втрати захисних властивостей споруд, ураження особового складу, бойової техніки і обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При ініціюванні вибуху у твердих і рідких речовинах з величезною швидкістю протікають екзотермічні окислювально-відновні реакції чи реакції термічного розкладання з виділенням теплової енергії [1, 2]. А газоподібні енергоносії являють собою гомогенні суміші пальних газів (пар) з газоподібними окислювачами повітрям, киснем, хлором і ін., або нестабільні газоподібні з'єднання, такі як ацетилен, етилен, схильні до термічного розкладання у відсутності окислювачів. Джерелом енергії вибухів газових сумішей є езотермічні реакції окислювання пальної чи речовини реакції розкладання нестабільних з'єднань [3].

Автори багатьох робіт [4-7] стверджують, що затікання зовнішнього повітря в захисні споруди через стики і місця нещільного контакту бетону з металом відбувається в результаті появи в бетоні тріщин.

Основну роль у виникненні тріщин у матеріалі заповнення стиків грає усадка [6]. В процесі експлуатації тріщини в бетонних стиках можуть виникати іноді від надмірних розтягуючих і зсувних навантажень, корозії, температурних і осадкових деформацій. Особливо сильне утворення тріщин на контакті метал-бетон відзначається в збірних конструкціях через прискороного режиму термообробки.

У різних галузях техніки, в конструкціях фортифікаційних споруд (система спеціального захисту в законструктивному просторі, захисних та внутрішніх

будівельних конструкціях) є ущільнення утворені стиком двох поверхонь, утворенні тріщини, які мають деяку кінцеву мікронерівність.

Контакт поверхонь завжди відбувається по площі, значно меншої номінальної, що називається площею фактичного контакту. Величина площі фактичного контакту залежимо від стану поверхонь, прикладеного зусилля і властивостей матеріалів поверхонь [4-7]. Внаслідок неповного контактування поверхонь, між ними завжди залишається певний кінцевий зазор, що при наявності різниці тисків середовища зовні і всередині об'єму що ущільнюється, приводить до витoku середовища через ущільнюваний стик. З'ясування закономірностей процесу течії (перебігу) газового середовища в зазорах, утворених мікронерівностями, представляє інтерес, так як знання цих закономірностей дозволить розраховувати витік середовища через ущільнення (тріщини). Особливо це важливо для рухливих ущільнень (тріщин), коли поверхні переміщуються одна відносно іншої.

В літературі наведено результати досліджень капілярних циліндричних [8] і плоских [2, 9] каналів, а також торцевих ущільнень (тріщин) з кінцевим зазором, утвореним поверхнями, обробленими до високої частоти [10]. Ці дослідження показують, що течія (*перебіг*) рідини чи газу в таких зазорах підкоряються законам гідродинаміки, застосовуваним для звичайних каналів.

У той же час в літературах немає даних про закономірності перебігу газу або рідини в каналах, утворених мікронерівностями (тріщинами). Досліджувалися тільки окремі питання, пов'язані з процесом перебігу [1, 2, 7, 11]. Ці дослідження показують, що течія (перебіг) рідини чи газу в таких каналах не підкоряються загальноприйнятим закономірностям.

Для вирішення завдання течії (перебігу) рідини чи газу в каналах, утворених мікронерівностями (тріщинами) припустимо, що реальні поверхні мають мікропрофіль, що найбільш повно характеризується поздовжньою і поперечною профілограмами, і побудованої на їх основі кривої опорної поверхні (для циліндричного торцевого ущільнення (тріщини) доцільно ввести

поняття радіальної та кутової профілограм) [12]. Перебіг газу відбувається тільки в тих місцях, де є контакт двох поверхонь - в зазорах між нерівностями. Численні звуження і розширення, утворені окремими мікронерівностями, злиття, розділення і перехрещення елементарних *струєн* призводить до аналогії з плином газу в середовищах.

Мета статті (постановка завдання). На основі моделі процесу газопроникності розрахувати параметри перебігу газових сумішей у матеріалах та елементах огорожувальних конструкцій спеціальних споруд через тріщини і торцеві ущільнення на стиках метал-бетон.

Виклад основного матеріалу. Течія (перебіг) в пористих середовищах характеризується залежністю гідравлічного опору як від першого, так і другого ступеня швидкості:

$$\frac{dp}{dx} = aw + bw^2, \quad (1)$$

де a – зближення мікроповерхонь;

b – ширина каналу.

Ця залежність підтверджується численними дослідженнями [2, 12]. У літературі, крім того, описано дослідження процесу витікання через шорсткість після "абразивної" обробки [1, 11]. Аналіз результатів цього дослідження показує, що для течії (перебігу) повітря в каналах утворених мікронерівностями, також має місце двочленний закон гідравлічного опору, відповідний рівнянню (1).

Таким чином, для дослідження характеристик процесу течії (перебігу) в таких каналах та обробки результатів експерименту доцільно застосувати методи, що використовуються для вивчення пористих середовищ. Як видно з теорії подібності [1], зв'язок параметрів процесу течії (перебігу) середовища в найбільш загальному вигляді можна отримати в критеріях подібності. Для руху, що підсилюється, основне критеріальне рівняння має вигляд

$$Eu = f(Re), \quad (2)$$

де $Eu = \frac{\Delta p}{w^2}$ - критерій Ейлера;

$Re = \frac{\rho w d_r}{\mu}$ - критерій Рейнольдса;

Δp - перепад тиску;

ρ - щільність газу;

w - швидкість;

d_r - характерний лінійний (визначаючий) розмір;

μ - коефіцієнт динамічної в'язкості газу.

Для цільового каналу

$$d_r = 2h, \quad (3)$$

де h - висота щілини.

Для каналу утвореного гладкою і шорсткою поверхнями, висота еквівалентної щілини h_s , може бути визначена як

$$h_s = \frac{1}{F} \int h dF, \quad (4)$$

де F - номінальна площа контактування.

З рівнянням кривої опорної поверхні

$$\eta = f(\varepsilon)$$

висота h_y може бути зв'язана як

$$h_y = h_m \left[1 - \int_0^1 f(\varepsilon) d\varepsilon \right],$$

де $\eta = \frac{F_r}{F}$;

F_r - площа фактичного каналу;

$\varepsilon = \frac{a}{h_m}$, a - зближення;

h_m - максимальна висота мікронерівностей.

Для дослідження поверхонь визначення характерного розміру слід зробити інакше. Дійсно, перебіг газу відбувається в напрямку нормалі до виступів і канавок, і розподіляється еквівалентно висотою і гладкою поверхнею. Цей зазор може бути знайдений так

$$h_0 = \frac{1}{e} \int_e h dx,$$

якщо відома кутова прифілограма.

Як відомо, для радіального каналу:

$$Re = \frac{1}{\pi g m} \cdot \frac{G}{r}, \quad (5)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\rho_1 w_1^2} \left(1 + \frac{p_2}{p_1}\right), \quad (6)$$

де p_1 и p_2 - тиск відповідно у внутрішній площині та ззовні ущільнення (тріщини);

G - вагова витрата;

g - прискорення вільного падіння;

r - радіус;

w_1 - швидкість на вході в канал.

Тоді, для радіального каналу с висотою зазору h_0 залежність (4) можна представити у виді

$$\frac{\Delta p}{\rho_1 w_1^2} \left(1 + \frac{p_2}{p_1}\right) = \frac{r_1}{h_0} \ln \frac{r_2}{r_1} f(Re), \quad (7)$$

де $\frac{r_1}{h_0} \ln \frac{r_2}{r_1}$ - відносна довжина каналу.

Відзначимо

$$\frac{\frac{\Delta p}{\rho_1 w_1^2} \left(1 + \frac{p_2}{p_1}\right)}{\frac{r_1}{h_0} \ln \frac{r_2}{r_1}} = Eu', \quad (8)$$

Саме в виді залежності $Eu' = f(Re)$ слід обробляти результати чисельного експерименту. Відповідно з цими міркуваннями і проводилося дослідження.

Досліджувалися 10 груп металевих зразків з параметрами $r_2 = 17,2$ мм, $\frac{r_2}{r_1} = 1,2 \div 1,5$. Частота поверхні їх торця відповідала 3, 4, 5 і 6 класам частоти поверхні. Висота мікронерівностей становила $h_m = 3,5 \div 65$ мкм, крок розташування гребенів $S = 30 \div 180$ мкм. Відношення $\frac{S}{h_m}$ змінювалось в межах $3 \div 12$.

Найбільшу трудність представляє визначення величини h_0 , так, як профілограф для запису профілю радіального зразка в кутовому напрямку не існує. Експериментальні дані оброблялися у вигляді залежності $Eu' = f(Re)$.

Аналіз отриманих даних показує, що існує два режими течії повітря в "зазорі". Перший режим - для значення $Re = 20$, при дотриманні залежності

$$Eu' = \frac{A}{Re},$$

де $A = const$.

При цьому опір каналу залежить тільки від першої швидкості

$$-\frac{dp}{dr} = \alpha \mu w,$$

тобто дотримується ламінарний режим.

Другий режим – при $Re > 20$ характеризується більш складною залежністю, в якості якої може бути прийнята

$$Eu' = \frac{B}{Re} + C,$$

де B і C – $const$.

При цьому режимі опір каналам починає залежати також і від другого ступеня швидкості.

$$\frac{dp}{dr} = \alpha \mu w + \beta \rho w^2,$$

тобто починають проявлятися закономірності, характерні для пористих середовищ. Крім того, характерною особливістю експериментальних даних є великий розкид точок, що досліджуються, для різних зразків, що мають однакові характерні розміри h_0 .

Всі ці обставини дозволяють зробити висновок, що значний вплив на процес течії повітря в каналі надає розширення струменю в обсязі елементарної комірки утвореної плоскою поверхнею арматури (бетону) і двома сусідніми гребенями мікровиступів.

Відомо, що облік струминного характеру потоку дозволив узагальнити результати експериментів з сипучими (крихкими) засобами шляхом введення коефіцієнта звуження ядра потоку в критеріальне рівняння.

Якщо розглянути течію газового струменя через елементарну комірку, можна уявити, що після виходу в обсяг осередку потік розширюється подібно вільного струменя, а потім знову звужується до величини, яка визначається h_0 .

Якщо канали (тріщини) утворені мікронерівностями, а також пористим середовищем, повинна існувати область значень, в якій існують ламінарний і турбулентний режими течій струменів внаслідок того, що розміри щілин або отворів можуть лежати в широкому діапазоні. Це має зовні виразитись як зменшення величини Re_{ϵ_0} .

Отже, для режиму $Re < Re_{\epsilon_0}$ коефіцієнт звуження повинен визначатися на основі теорії ламінарного струменя, і тільки після $Re > Re_{\epsilon_0}$ стають справедливими залежності, отримані з урахуванням теорії турбулентного струменя. Коефіцієнт звуження турбулентного струменя може бути знайдений на підставі робіт [2, 3, 12].

Для струменя що рухається уздовж твердої стіни, профіль швидкостей в ній можемо вирахувати за формулою

$$\frac{U_m}{U_0} = \left[\frac{1}{0,0887 \frac{x-x_n}{b} + 1} \right]^{0,555}, \quad (9)$$

де U_0 - швидкість на виході з каналу;

U_m - швидкість на кордоні прикордонного шару;

x_n - координата кінця перехідної ділянки;

b_0 - ширина каналу; x - поточна координата.

З урахуванням (9) межа ядра постійної маси може бути знайдена з рівняння

$$\xi_y^2 - 0,8\xi_y^{2,5} + 0,25\xi_y^4 + 0,0875 = 0,403 \left(\frac{1}{0,0887 \frac{x}{b_0} - 0,198} \right)^{0,444} \quad (10)$$

Для профілю елементарної комірки, близького до трикутника, можна отримати з (10) наступну наближену формулу для визначення коефіцієнта звуження ядра постійної маси:

$$\varphi_\pi = \frac{h_1}{h_0} = 1 + \frac{2 \frac{S}{h_0} + 13}{\frac{S}{h_m - h_0} + 60} \quad (11)$$

де h_1 - ширина ядра постійної маси.

Коефіцієнт звуження ламінарної струменя φ_π повинен визначатися на підставі залежностей, що описують поле швидкостей ламінарного струменя. Однак рішення задачі про рух ламінарного струменя кінцевої ширини в літературі до цих пір немає [1, 13].

Висновки. Таким чином, на основі моделі руху ламінарної течії об'ємно-детонуючих газових сумішей, розраховано параметри процесу їх руху через тріщини і торцеві ущільнення матеріалів та елементів огорожувальних конструкцій спеціальних споруд. Запропонована модель та отримані дані можуть бути використані для розроблення нових технологій сучасної

фортифікації для забезпечення надійного захисту особового складу, техніки і обладнання.

Перспективи подальших досліджень. Необхідно в подальшому знайти рішення задачі про рух ламінарного струменя кінцевої ширини у вільному обсязі і вздовж твердої стінки і використовувати його для визначення більш точного коефіцієнта φ_{π} , що дозволить визначити закономірності формування мікро- та макроструктури залізобетону і сталевібробетону огорожувальних спеціальних конструкцій.

Література

1. **Седов Л.И.** Методы подобия и размерности в механике [текст] / Л.И. Седов – М.: Наука, 1987. – 432с.
2. Численные методы в задачах физики взрыва и удара [текст] // Учебник для ВТУЗов (Под редакцией В.В. Саливанова). – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 516с.
3. **Егоров К.А.** Перспективные бетонобойные боеприпасы ведущих стран НАТО [текст] // К.А. Егоров // Зарубежное военное обозрение. – 2001. - №2. – С.36-38.
4. Герметизация сооружений [Текст] // Справочное пособие. Под общ. ред. А.П. Смирнова.-М.:Военное издательство Министерства обороны СССР, 1979.-168 с.
5. **Бочарников А.С.** Свойства и применение сталевібробетона, изготовленного способом раздельного бетонирования [Текст] / А.С. Бочарников // В кн.: Материалы X научно-технической конференции.- Л.: ЛВВИСУ, 1987. - С.71.
6. **Огороднев Б.Е.** Заделка трещин в железобетонных конструкциях методом инъекции водоцементных смесей и полимерных смол [Текст] / Б.Е. Огороднев // Автореф. дис. канд. техн. наук / Б.Е. Огороднев - Свердловск, 1966. - 18 с.
7. **Убайдуллаєв Ю.Н.** Модель адиабатичного перебігу газу в радіальному каналі. [текст] / Ю.Н. Убайдуллаєв // Тези. Матеріали 11 науково-технічної конференції “Створення та модернізація озброєння і військової техніки в сучасних умовах”. Феодосія: – 2011. – С. 220-221
8. **Дыбан Е.Н., Швец И.Т.** Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и теплообмена при течении воздуха в капиллярных каналах [текст] / Е.Н. Дыбан, И.Т. Швец // Известия АН СССР, СТН, 1956. - №2. 2 С. 34-42.
9. **Яковлев Ю.С.** Гидродинамика взрыва [текст] / – Ю.С. Яковлев. // Л.: Судпромгиз, 1961. – 313с.
10. **Голубцев А.И.** Современные уплотнения вращающихся валов [текст] / А.И. Голубцев. – М.: Машгиз, 1963.
11. Турбулентные течения реагирующих газов: Пер. с англ. [текст] / Под реда. П. Либби, Ф.Вильямса. – М.:Мир, 1983. – 328с.
12. **Бренштейн Р.С., Померанцев В.В., Шагалова С.Л.** Обобщенный метод расчетов аэродинамического сопротивления нагруженных сечений [текст] / Р.С. Бренштейн, В.В. Померанцев, С.Л. Шагалова // СБ. "Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах". – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 359с.
13. **Лойцянский Л.Г.** Ламинарный пограничный слой / Л.Г. Лойцянский. – М.: Физматгиз, 1960. – 289с.