

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В РАЗРЯДНОІМПУЛЬСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Проектування устаткування для розрядноімпульсних технологій передбачає аналіз і синтез процесів, що протікають як у всій установці в цілому, так і в окремих її блоках. При цьому потрібен детальний опис умов, виконання яких дозволить адекватно описати досліджуваний об'єкт формалізованою мовою на стадії моделювання, аналізувати різні моделі технологічних процесів, замінювати натурні випробування обчислювальним експериментом, тобто знижувати часові і матеріальні витрати на проектування. При обчислювальному експерименті можна віртуально змінювати не тільки параметри технологічного режиму, а й конструктивні параметри установки, тобто застосовувати методи геометричного моделювання.

Ключові слова: розрядноімпульсна технологія, електричний розряд, математична модель, ударна хвиля, акустичне поле.

Для імпульсних технологічних процесів характерне наступне: наявність потужних висококонцентрованих потоків енергії; істотна нерівновага процесів; високі швидкості навантаження об'єкта обробки; наявність складного тепломасообміну; можливість існування декількох різних фаз в об'єкті обробки; зміна структури і властивостей об'єкта обробки в процесі навантаження [2].

Повне врахування цих характеристик в ідеалізованих і матеріальних моделях істотно ускладнює проектування, оптимізацію і контроль імпульсних технологічних процесів, а також створює великі труднощі при випробуваннях і налагодженні технологічних комплексів. Тому при моделюванні особлива увага приділяється оптимальному вибору способів навантаження об'єкта висококонцентрованими потоками енергії, які можна розділити на наступні класи: поверхневі і об'ємні; імпульсні і імпульсно-періодичні; зосереджені і розподілені; нерухомі і рухомі. Для різних класів модельні задачі вирішуються різними методами і мають різні ступені складності.

Характерні особливості імпульсних технологій обмежують можливості точного математичного опису процесів. Таким чином, повне врахування цих та інших особливостей, що характеризують імпульсні процеси, при моделюванні може виявитися неможливим. У цьому випадку використовують методи ідеалізації та абстрагування. Безумовно, що критерієм адекватності одержуваної інформації про реальні процеси, що протікають в імпульсних системах, є натурний експеримент. Але і для постановки натурального експерименту використовуються методи моделювання, спрямовані на пошук місця розташування чутливих точок технологічного процесу, діапазонів сталого функціонування, ступеня впливу різних керуючих факторів.

В багатьох розрядноімпульсних технологіях застосовується циліндрична розрядна камера з різноманітними електродними системами. Тому в статті розглядається модель електровибуху циліндричної симетрії [3].

Наприклад, імпульсний вплив при очищенні свердловин здійснюється передачею імпульсу тиску стовпа води в свердловині її фільтру. Імпульс тиску передається фільтру у вигляді ударної і акустичних хвиль, які супроводжуються перехідними процесами. Ударна хвиля створюється швидким (близько 1 ... 100 мкс) виділенням енергії в середовищі, що піддається імпульсному впливу.

Розрядна камера представляє собою циліндричну порожнину з жорсткими підставами і бічною поверхнею з перфораційними отворами. Отримані результати показують, що головним фактором електророзрядного впливу на тендітні відкладення при декольматації свердловини є амплітуда хвилі тиску. Отже, при обробці треба прагнути до максимально можливої амплітуді хвилі тиску, що можна досягти на режимі електророзрядного впливу з оптимальним МЕР за амплітудою хвилі тиску [4].

Руйнівна дія ударних і акустичних хвиль, що генеруються розрядним каналом, що розширюється у воді, використовується в установках очищення внутрішніх поверхонь труб. Руйнування твердих мінеральних відкладень відбувається за рахунок здвигової напруги і напруги розтягування, що вини-

кає в них при взаємодії хвиль з кордонами розділу рідина-відкладення-труба і здатних їх відшарувати. Така ж технологія застосовується для розвальцьовування у трубних ґратах теплообмінників. Процес запресовки труб в трубних ґратах теплообмінних апаратів полягає в утворенні натягу між трубою і трубними ґратами після деформації їх імпульсним тиском, що створюється при електричному розряді або вибуху зволікання в спеціальному патроні, встановленому усередині труби.

Існує значна кількість робіт (їх огляд наведено в [5]), присвячених оцінці гідродинамічних течій при електричному розряді у воді (ЕРВ). Основними прийомом для відшукування аналітичного рішення гідродинамічних задач є застосування методу інтегральних перетворень (Фур'є, Лапласа, Ханкеля) до хвильовому рівнянню про одній або кільком змінним завдання, що дозволяють отримати алгебраїчну систему рівнянь, або знизити розмірність вихідної системи диференціальних рівнянь. Для врахування нелінійних ефектів у роботі [3] було запропоновано використовувати наближення Кірквуда-Бете, справедливе лише в області фронту ударної хвилі. При обчисленні параметрів хвостовій частині хвилі і гідродинамічних характеристик каналу розряду такий підхід виявився неприйнятним.

Комплексний аналіз нелінійних ефектів, що виникають при ЕРВ, проводився з використанням системи рівнянь газової динаміки. В [4] розв'язання проводилось методом характеристик, що дозволяло отримати детальний опис руху рідини. Та при розрахунках динаміки рідини в областях з наявністю безлічі хвильових фронтів, зокрема, в областях з відбиваючими поверхнями, метод характеристик стає малоприматним.

Найбільше поширення при інтегруванні системи рівнянь газової динаміки отримала явна кінцево-різницева схема С. К. Годунова [1], що дає можливість явно виділити поверхні розриву і добре адаптується до особливостей течій.

У роботі розглядається електричний розряд у порожнинах циліндричної форми. Передбачається, що в їх внутрішніх областях, заповнених рідиною, на осі симетрії виробляються електричні розряди. Кінцева мета на даному етапі - достовірно визначити вид імпульсу тиску на поверхнях, оточуючих описані конструкції.

Вводяться наступні припущення і допущення фізичного і геометричного характерів:

- в початковий момент часу вже сформований канал електричного розряду, що представляє собою циліндр кінцевої довжини, це дозволяє звести задачу до розгляду вісесиметричного випадку;
- рідина, що заповнює і навколишнє конструкцію, ідеальна й стислива;
- рух її безвихровий;
- для опису руху навколишньої рідини припустимо акустичне наближення;
- деформування стінок випромінювача відбувається пружно, згідно закону Гуку для ізотропних середовищ;
- радіус циліндра не менший, ніж на порядок, перевищуємо товщину пружних стінок.

Поблизу плазмової порожнини, що утворюється при електричному розряді у воді, можуть формуватися ударні хвилі з великою амплітудою, що викликає необхідність залучення нелінійних співвідношень для їх опису. Використовується система рівнянь газової динаміки в циліндричній системі координат roz [1]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(F_1 r)}{\partial t} + \frac{\partial(F_2 r)}{\partial z} + \frac{\partial(F_3 r)}{\partial r} &= F_4, \quad F_1 = [\rho, \rho u_r, \rho u_z, \varepsilon]^T, \\ F_2 &= [\rho u_z, \rho u_z u_r, \rho u_z^2 + p, (\varepsilon + p) u_z]^T, \quad F_3 = [\rho u_r, \rho u_r^2 + p, \rho u_z u_r, (\varepsilon + p) u_r]^T, \\ F_4 &= [0, p, 0, 0]^T, \quad \varepsilon = \rho \left[E + (u_z^2 + u_r^2) / 2 \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Система рівнянь (1) замикається рівнянням стану, яке для води в широкому діапазоні зміни тисків має вигляд (2):

$$E = \frac{p + \gamma B}{\rho(\gamma - 1)} - \frac{c_0^2}{\gamma - 1} \quad (2)$$

де $B = \rho_0 c_0^2 / \gamma$, при цьому для води $\rho_0 = 10^3 \text{ кг/м}^3$; $c_0 = 1460 \text{ м/с}$; $\gamma = 7,15$; $B = 298,6 \text{ МПа}$.

Моделюванню умов на границі «вода - плазма» приділено значну увагу у літературі [4, 5]. У даному випадку використовується один з найпростіших способів завдання крайових умов такого типу, що передбачає, що заздалегідь відомі значення енергії E_p , що вводиться в канал розряду, і час її введення τ_p . Тоді зв'язок між енергетичними характеристиками розряду і гідродинамічними параметрами здійснюється за допомогою рівняння балансу енергії [4]:

$$\frac{\gamma_{\Pi} p_{\Pi}}{\gamma_{\Pi} - 1} \dot{V}_{\Pi} + \frac{V_{\Pi}}{\gamma_{\Pi} - 1} \dot{p}_{\Pi} = N_{\Pi}(t), \quad (3)$$

де $\gamma_{\Pi} = 1,26$ - ефективний показник адіабати плазми; для потужності $N_{\Pi}(t)$ встановлено закон введення

$$N_{\Pi}(t) = \begin{cases} \frac{4t}{\tau_p^2} E_p, & \text{при } 0 \leq t \leq 0,5\tau_p \\ \frac{4(\tau_p - t)}{\tau_p^2} E_p, & \text{при } 0,5\tau_p < t \leq \tau_p \\ 0, & \text{при } \tau_p < t. \end{cases} \quad (4)$$

На внутрішній поверхні циліндра задовольняються умови динамічної сумісності між нормальними швидкостями рідини U і тіла, що деформується тіло u_{ξ} і тиском p_1^* на поверхні розриву [1]

$$p_1^* = p - a(U - u_{\xi}), \quad (5)$$

де a - масова швидкість, що визначається з співвідношень:

$$a = \begin{cases} \sqrt{\frac{\rho}{2} [(\gamma + 1)(p_1^* + B) + (\gamma - 1)(p + B)]}, & \text{при } p_1^* \geq p; \\ \frac{\rho c_0 (\gamma - 1) \left(1 - \frac{p_1^* + B}{p + B}\right)}{2\gamma} \left[1 - \left(\frac{p_1^* + B}{p + B}\right)^{\frac{\gamma - 1}{2\gamma}}\right], & \text{при } p_1^* < p. \end{cases} \quad (6)$$

У разі, якщо перешкода, з якою взаємодіє внутрішня хвиля тиску, нерухома в рівнянні (5) покладається $u_{\xi} = 0$.

Для чисельного розв'язання наведеної системи рівнянь, використовується метод кінцевих різниць. Інтегрування системи рівнянь (1-3) здійснюється за допомогою явної двошарової схеми С. К. Годунова [1], що допускає розрахунок у рухливих сітках і дозволяє явно виділити характерні розриви - фронт ударної хвилі і поверхні каналу розряду.

Метод отримання розв'язання рівнянь (1) полягає в інтегруванні по деякому об'єму ω в просторі r, z, t :

$$\iint_{\chi} F_1 r dr dz + F_2 r dr dt + F_3 r dz dt = \iiint_{\omega} F_4 dr dz dt, \quad (11)$$

де χ - поверхня, що обмежує об'єм ω .

Початкове положення зовнішнього кордону задається певною мірою довільно поблизу каналу розряду. Розмазана по рухомій сітці ударна хвиля, що рухається з надзвуковою швидкістю, незабаром наздоганяє зовнішню межу і надалі збігається з нею. Якщо зовнішня межа при $t = 0$ розташована не далі двох - п'яти радіусів каналу розряду, то вихід ударної хвилі на зовнішній кордон відбувається за короткий час, і вибір початкового положення кордонів не впливає на рішення вже в ближній до каналу зоні рідини. Гідродинамічні параметри всередині розрахункової області приймають як для

незбуреної рідини. В даній роботі пропонується використовувати на зовнішньому кордоні розрахункової області умови, які не генерують відображену всередину хвилю.

Для конкретних розрахунків досліджувались хвильові процеси, що відбувалися при розряді всередині циліндру радіуса $R = 0,24$ м і довжини $2L = 0,48$ м. Матеріал, з якого виготовлений циліндр, - сталь з параметрами: $E' = 2 \cdot 10^{11}$ Па; $\mu = 0,3$; $\rho_M = 7800$ кг/м³. Товщина оболонки $h = R/120$. Характеристики ЕРВ: довжина каналу розряду $l_p = 0,04$ м; $E_p = 4,5$ кДж; $\tau_p = 30$ мкс.

Результати розрахунків наведено на рис. 1–2 Тут початковий момент часу $t = 0$ відповідає торкання бічній поверхні циліндра хвильової стиснення. Рис. 1 ілюструє тиск на внутрішній поверхні циліндричної оболонки, а рис. 2 в її серединному перетині. Варіювалася також товщина циліндру – вона становила $R/60$ (криві 1), $R/120$ (криві 2) і $R/240$ (криві 3).

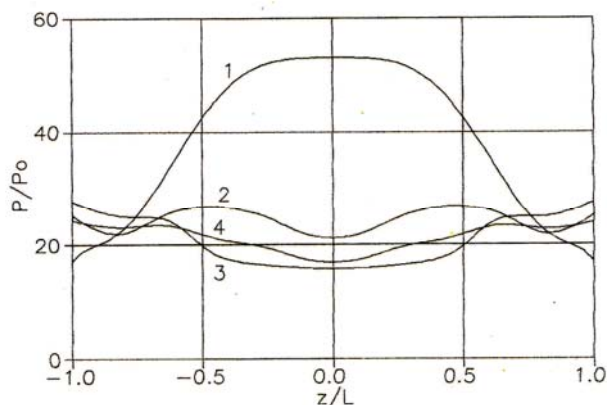


Рис. 1. Розподіл тиску уздовж внутрішньої поверхні циліндра

На рис. 2 розподіл тиску представлено в моменти $t = 40, 100, 120$ мкс (криві 1, 2, 3). Збурення різних ділянок внутрішньої поверхні проводиться не синхронно. Тому в початковий період взаємодії хвилі стиснення з оболонкою різко зростає тиск у центральній точці ($R; 0$). Потім, у міру розповсюдження хвиль в матеріалі конструкції, тиск в центрі знижується, а навантаження на краю оболонки зростає.

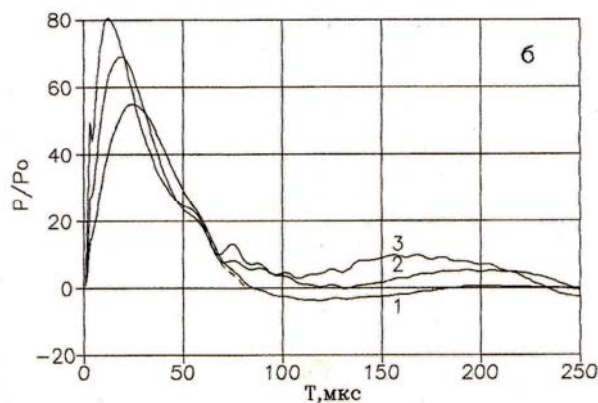


Рис. 2. Тиск на поверхні циліндра в його серединному перерізі

Список використаних джерел

1. Барбашова Г. А., Иванов А. В. Расчет двумерного нестационарного течения жидкости при подводном электрическом взрыве проволоки конечной длины [Текст] // Гидромеханика. — 1986. — Вып. 53. — С. 16—19.
2. Замышляев С. В., Яковлев Ю. С. Динамические нагрузки при подводном взрыве [Текст]. — Л. : Судостроение, 1967. — 387 с.
3. Иванов В. В. О погрешностях, возникающих при исследовании цилиндрических подводных электрических взрывов в приближении Кирквуда Бете [Текст] // Физика горения и взрыва. — 1981. — № 3. — С. 142—143.
4. Наугольных К. А., Рой Н. А. Электрические разряды в воде [Текст]. — М. : Наука, 1971. — 151 с.
5. Поздеев В. А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости [Текст]. — К. : Наук. думка, 1980. — 192 с.

Alexander MELNIK
Nikolaev

SIMULATION OF HYDRODINAMIC PROCESSES IN RAZRYADNOIMPULSNIH TECHNOLOGY

Designing of equipment for razryadnoimpulsnyh technology involves analysis and synthesis processes that occur both during the entire installation as a whole and in its individual blocks. It should be a detailed description of the conditions which will allow to adequately describe the object under study formalized language at the modeling stage, analyze the different models of technological processes, replacing full-scale tests of computational experiments, that is, to reduce the time and costs for the design. When computing experiment can virtually change not only the parameters of the technological mode, but the installation and design parameters, that is to apply the methods of geometric modeling.

Key words: razryadnoimpulsnaya technology, electrical discharge, a mathematical model, the shock wave, the acoustic field.

Александр МЕЛЬНИК
Николаев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В РАЗРЯДНОИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

Проектирование оборудования для разрядноимпульсных технологий предполагает анализ и синтез процессов, протекающих как во всей установке в целом, так и в отдельных ее блоках. При этом нужно детальное описание условий, выполнение которых позволит адекватно описать исследуемый объект формализованным языком на стадии моделирования, анализировать различные модели технологических процессов, заменять натурные испытания вычислительным экспериментом, то есть снижать временные и материальные затраты на проектирование. При вычислительном эксперименте можно виртуально менять не только параметры технологического режима, но и конструктивные параметры установки, то есть применять методы геометрического моделирования.

Ключевые слова: разрядноимпульсная технология, электрический разряд, математическая модель, ударная волна, акустическое поле.

Стаття надійшла до редколегії 30.09.2016