

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

Ромашов Юрій Володимирович

УДК 539.3

**РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ КОНТАКТНИХ НАПРУЖЕНЬ
НА УЩІЛЬНЮВАЛЬНИХ ПОВЕРХНЯХ ЗАТВОРІВ
ВИСОКОГО ТИСКУ**

Спеціальність 05.02.09 - динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2001

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, доцент

Сало Валентин Андрійович,

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
доцент кафедри теоретичної механіки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Курпа Лідія Василівна,

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
завідувач кафедри прикладної математики;

доктор технічних наук, професор

Симоновський Віталій Іович,

Сумський державний аграрний університет,

завідувач кафедри теоретичної та прикладної механіки.

Провідна установа: Інститут проблем міцності НАН України,

відділ математичного моделювання і аналітичного аналізу розв'язання задач
механіки деформівного твердого тіла, м. Київ.

Захист відбудеться " 17 " жовтня 2001 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 64.050.10 у Національному технічному університеті "Харківський політехнічний ін-
ститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харків-
ський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

Автореферат розісланий " 10 " вересня 2001 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

Бортовой В. В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Посудини високого тиску широко використовують в промисловості для здійснення різноманітних технологічних процесів, наприклад для синтезу речовин або обробки матеріалів, а також у наукових дослідженнях для вивчення фізико-хімічних процесів при високих тисках. Герметичність посудин високого тиску забезпечують ущільнювальні елементи затворів. У затворах, які часто розбирають, герметичність забезпечують за рахунок контактного тиску, який створюють на ущільнювальних поверхнях. Забезпечення герметичності затворів є важливою науково-технічною проблемою. Технічні характеристики посудин високого тиску обумовлені можливостями ущільнень, які встановлюють розрахунками на етапі проектування.

Актуальність теми. Розповсюджені методи розрахунку контактних тисків на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску основані на спрощених моделях ущільнень. Моделі ущільнень у вигляді стержнів, пластин та оболонок не завжди дозволяють обґрунтувати вибір конструктивних параметрів ущільнень при їх проектуванні. Тому у багатьох сучасних дослідженнях основна увага приділяється удосконаленню існуючих та розробці нових моделей та методів розрахунку контактних тисків на ущільнювальних поверхнях. Враховуючи поширення у застосуванні технологій високих тисків у багатьох галузях сучасної промисловості, розробка адекватних моделей та методів розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску є актуальною науковою та прикладною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Роботу виконано на кафедрі теоретичної механіки Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" (НТУ "ХПІ") у рамках координованих Міністерством освіти і науки України держбюджетних тем: "Побудова теоретичних основ розрахунків нелінійної повзучості та руйнування деформівних тіл за умов дії зовнішніх швидко осцилюючих полів навантаження" на 1997-1999 р.р. (шифр М1002, наказ № 277-П від 17.04.1997 р.) і "Створення теорії та методів розрахунку тонкостінних конструкцій з ізотропних та ортотропних матеріалів, що пошкоджуються при повзучості" на 2000-2003 р.р. (шифр М1003, код 040101, наказ № 3-П від 04.01.2000 р.).

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробка методу розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску, основаного на розв'язанні крайових задач теорії пружності для тривимірних і двовимірних тіл складної форми за допомогою варіаційно-структурного методу теорії R-функцій та мішаного принципу Рейсснера. Для реалізації цієї мети у роботі вирішено наступні задачі:

- сформульовано математичні постановки контактних задач теорії пружності для просторових тіл на основі мішаного принципу Рейсснера;
- запропоновано структури розв'язків, які точно задовольняють усім граничним умовам контактної задачі і відповідають варіаційно-структурному методу розв'язання задач теорії пружності на

основі мішаного принципу Рейсснера, для аналізу напружено-деформованого стану контактних ущільнень, які взаємодіють з більш жорсткими стінками затворів високого тиску;

- створено методичку оцінювання точності наближених розв'язків та виконано тестування програмного забезпечення, створеного для аналізу осесиметричного напружено-деформованого стану тіл обертання;
- досліджено збіжність послідовності наближених розв'язків мішаних контактних задач, які отримані за допомогою запропонованого в роботі методу;
- отримано розв'язки прикладних задач для кільцевих ущільнень зі складною формою перерізу, які застосовують для герметизації затворів посудин високого тиску для переробки речовин атомної промисловості.

Об'єктом дослідження є ущільнення, якими забезпечують герметичність затворів високого тиску за рахунок гарантованого рівня контактного тиску на їхніх ущільнювальних поверхнях.

Предмет дослідження - напружено-деформований стан ущільнень та розподіл контактних тисків на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску. **Методи дослідження** містять варіаційно-структурний метод теорії R-функцій та обчислювальні методи, які орієнтовані на застосування ЕОМ для визначення контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів.

Наукова новизна одержаних результатів. Виконані в роботі дослідження дозволили одержати нові наукові результати:

- дістав подальшого розвитку варіаційно-структурний метод теорії R-функцій, який уперше застосовано для пошуку стаціонарної точки мішаного функціоналу Рейсснера при розв'язанні просторових контактних задач теорії пружності;
- створено нові структури розв'язків просторових контактних задач у довільних криволінійних координатах, які відповідають варіаційно-структурному методу теорії R-функцій для розв'язання контактних задач теорії пружності на основі мішаного принципу Рейсснера;
- теоретично та на основі розрахункових даних уперше надано обґрунтування внутрішньої збіжності розв'язків просторових крайових задач теорії пружності, які отримані за варіаційно-структурним методом теорії R-функцій для пошуку стаціонарної точки неекстремального функціоналу Рейсснера на класі напружень і переміщень, які точно задовольняють усім граничним умовам задачі;
- уперше, для оцінки точності розв'язків варіаційних задач для мішаного функціоналу Рейсснера, використано ступень задоволення рівності між підрахованими на цих розв'язках функціоналами Лагранжа, Кастиліано та Рейсснера, значення яких точно збігаються лише в їхніх стаціонарних точках.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблений метод розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску застосовано в Інституті фізики

твердого тіла, матеріалознавства та технологій Національного наукового центру "Харківський фізико-технічний інститут" (ІФТТМТ ННЦ "ХФТІ") для розрахунків ущільнення затвору газостатичної установки. Це підтверджено актом із застосування розробок та результатів досліджень дисертаційної роботи.

Особистий внесок здобувача. Усі результати дисертаційної роботи отримано особисто здобувачем. У опублікованих із співавторами роботах здобувачу належать: в [1] - результати теоретичного обґрунтування критерію оцінки точності наближених розв'язків варіаційних задач для функціоналу Рейсснера, в [2] - обґрунтування збіжності розв'язків рівняння стаціонарності функціоналу Рейсснера, в [3, 4] - розрахункові дані дослідження із точності наближених розв'язків варіаційних задач для функціоналу Рейсснера, в [5] - граничні умови на поверхнях контакту деформованого тіла з жорстким штампом, структури розв'язків та результати розрахунків, в [6, 7] - математична постановка задачі, структури розв'язків, наведені розрахункові дані контактних тисків на ущільнювальних поверхнях затвору газостатичної установки високого тиску.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи обговорювалися на міжнародних науково-технічних конференціях: "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я" (м. Харків) у 1999 р., "Фізичні і комп'ютерні технології в народному господарстві" (м. Харків) у 2000 р. та 2001 р., на міському науково-методичному семінарі кафедр теоретичної механіки м. Харкова (керівник - проф. Морачковський О.К.) у 1999 р., на науковому семінарі кафедри "Динаміка та міцність машин" НТУ "ХПІ" (керівник - проф. Львов Г.І.) у 2000 р.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 наукових праць, з яких 6 опубліковано у фахових виданнях, оговорених ВАК України, 2 - у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (133 найменувань), 82 рисунків, 14 таблиць, трьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 202 сторінки, з яких основний текст містить 134 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У **вступі** надано загальну характеристику роботи.

Огляд стану проблеми за темою роботи, типів конструкцій затворів високого тиску та існуючих методів розрахунку ущільнень розглянуто у **першому розділі** роботи.

У **підрозділі 1.1** розглянуто найбільш розповсюджені конструкції ущільнень затворів високого тиску та теоретичні методи, які використовують для оцінки їх герметичності. На підставі огляду літературних джерел зазначено, що герметичність затворів оцінюють по об'єму витікання робочого середовища за одиницю часу із використанням моделей ущільнювальних з'єднань у вигляді еквівалентної трубки або пористого шару. Встановлено суттєвий вплив на герметичність затворів рівня контактного тиску p_k на ущільнювальних поверхнях та конструктивних параметрів

ущільнення. При виборі ущільнень користуються критерієм перевищення контактних тисків на ущільнювальних поверхнях граничної величини $p_{k\min}$, яка залежить від багатьох факторів, насамперед, від конструкції затвору, властивостей робочого середовища, рівня робочого тиску. При багаторазовому використанні ущільнень неприпустимі незворотні пластичні деформації, що значно обмежує допустимі рівні навантаження ущільнень. У цьому випадку розрахунки контактних напружень на ущільнювальних поверхнях виконують на основі розв'язання контактних задач теорії пружності.

Підрозділ 1.2 присвячено огляду методів розв'язання контактних задач теорії пружності. З'ясовано, що широко розповсюджені методи розрахунку напружено-деформованого стану ущільнень основані на спрощених розрахункових схемах, наприклад, у вигляді стержнів чи оболонок та не завжди дозволяють обґрунтувати вибір конструктивних параметрів ущільнень при проектуванні. Зроблено висновок про необхідність у створенні нових методів, які були б основані на розв'язанні тривимірних та двовимірних задач теорії пружності, для розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів. За аналізом літературних джерел встановлено, що у просторових тілах, якими моделюють ущільнення затворів, визначення напружено-деформованого стану здійснюють за методом скінчених елементів (МСЕ) із застосуванням варіаційного принципу Лагранжа. Недоліком такого підходу є те, що напруження в тілах та на їхніх контактних поверхнях визначаються із використанням похідних від наближено знайдених переміщень. Це зменшує точність визначення напружень у порівнянні із точністю, з якою одержані переміщення. Крім цього, скінчено-елементні апроксимації не дозволяють точно задовольняти умовам щільного контакту взаємодіючих поверхонь. Зроблено висновок, що для більш адекватного визначення контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску доцільно використати варіаційно-структурний метод теорії R-функцій, який дозволяє точно задовольняти усім граничним умовам та умові щільного контакту взаємодіючих поверхонь, а розв'язання контактних задач теорії пружності при цьому здійснити на основі мішаного принципу Рейсснера із незалежною апроксимацією переміщень та напружень. Це надасть можливість отримувати напруження та переміщення в тілах із однаковою точністю, а їхні наближення у вигляді структур розв'язків будуть точно задовольняти умовам щільного контакту взаємодіючих поверхонь, що підвищить точність розрахунків контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску.

У **другому розділі** здійснено математичну постановку просторових задач о взаємодії пружних тіл з жорсткими штампами на основі мішаного варіаційного принципу Рейсснера у довільних криволінійних координатах α^i , $i=1,3$. У роботі розглянуто поверхні тіла $S = S_t \cup S_u \cup S_c$, на ділянках яких - S_t, S_u відповідно задані зовнішні тиски

$$\sigma^i n_j = t^i, \quad (1)$$

та переміщення

$$u_i = u_i^*, \quad (2)$$

а дільниця поверхні тіла - S_c взаємодіє із жорсткими штампами.

До розв'язання таких задач можна звести розрахунки різноманітних ущільнень, що взаємодіють з більш жорсткими стінками затворів.

Умови щільного контакту в точках α_0^i контактної поверхні тіла - S_c із зовнішньою нормаллю \vec{n} , при взаємодії із гладким жорстким штампом довільної форми f_p $\alpha_0^i = 0$, сформульовано в підрозділі 2.1.

Рівняння щільного контакту

$$f_p \alpha_0^i + u^i = 0, \quad (3)$$

після розвинення у ряд по компонентам вектора переміщень в лінеаризованому наближенні прийнято у вигляді:

$$f_p \alpha_0^k + u^i \nabla_i f_p \alpha_0^k = 0. \quad (4)$$

У роботі, за рахунок переходу в (4) від контраваріантних компонент вектора переміщень до його проєкцій на ортонормовані вектори $\vec{n}, \vec{\tau}, \vec{b}$, нормальні переміщення точок тіла під штампом представлені так:

$$u_n = u_n^* \alpha_0^k + k_\tau \alpha_0^k u_\tau + k_b \alpha_0^k u_b, \quad (5)$$

$$\text{де } u_n^* \alpha_0^k = -\frac{f_p \alpha_0^k}{n^i \nabla_i f_p \alpha_0^k}, \quad k_\tau \alpha_0^k = -\frac{\tau^j \nabla_j f_p \alpha_0^k}{n^i \nabla_i f_p \alpha_0^k}, \quad k_b \alpha_0^k = -\frac{b^j \nabla_j f_p \alpha_0^k}{n^i \nabla_i f_p \alpha_0^k}.$$

Рівняння (5) можна застосовувати при виконанні умови

$$n^i \nabla_i f_p \alpha_0^k \neq 0. \quad (6)$$

Далі з'ясовано, що у випадку невиконання умови (6) нормальні переміщення точок тіла під штампом можна представити у вигляді:

$$u_n = u_n^* \alpha_0^k + k_\tau \alpha_0^k u_\tau + k_b \alpha_0^k u_b, \quad (7)$$

$$\text{де } u_n^* \alpha_0^k = \pm \sqrt{\frac{2f_p \alpha_0^k}{\frac{\partial^2 f_p \alpha_0^k}{\partial \alpha^i \partial \alpha^j} n^i n^j}},$$

$$k_\tau \alpha_0^k = \mp \frac{\tau^m \nabla_m f_p \alpha_0^k}{\sqrt{-2f_p \alpha_0^k \frac{\partial^2 f_p \alpha_0^k}{\partial \alpha^i \partial \alpha^j} n^i n^j}} - \frac{\frac{\partial^2 f_p \alpha_0^k}{\partial \alpha^i \partial \alpha^j} n^i n^j + \tau^j n^i}{2 \frac{\partial^2 f_p \alpha_0^k}{\partial \alpha^i \partial \alpha^j} n^i n^j},$$

$$k_b \alpha_0^k = \mp \frac{b^m \nabla_m f_p \alpha_0^k}{\sqrt{-2f_p \alpha_0^k - \frac{\partial^2 f_p \alpha_0^k}{\partial \alpha^i \partial \alpha^j} n^i n^j}} - \frac{\frac{\partial^2 f_p \alpha_0^k}{\partial \alpha^i \partial \alpha^j} b^i n^j + b^j n^i}{2 \frac{\partial^2 f_p \alpha_0^k}{\partial \alpha^i \partial \alpha^j} n^i n^j}.$$

Варіаційну постановку контактних задач здійснено в **підрозділі 2.2** на основі мішаного принципу Рейсснера для тіл із поверхнею контакту $S_c = S_{c1} \cup S_{c2} \cup S_{c3}$, на ділянках якої - S_{c1} , S_{c2} , S_{c3} задані наступні умови для переміщень:

$$S_{c1} : u_i n^i - \tau^i k_{\tau i} - b^i k_{b i} = u_{n1}^*, S_{c2} : u_i = u_{n2}^* n_i, S_{c3} : u_i n^i = u_{n3}^*, \quad (8)$$

що узагальнює задачу відповідно до можливих випадків взаємодії тіла з різними за формою штампами.

Визначення напружено-деформованого стану тіл, які взаємодіють із жорсткими штампами на заданій області контакту S_c , зведено до пошуку стаціонарної точки функціоналу Рейсснера.

Умову стаціонарності цього функціоналу в роботі отримано у вигляді:

$$\begin{aligned} & \iiint_V \left[\delta \sigma^{ij} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial \alpha^j} + \frac{\partial u_j}{\partial \alpha^i} \right) - \left[\begin{matrix} k \\ ij \end{matrix} \right] u_k - d_{ijm} \sigma^{kl} \right) - \delta u_j \left(\frac{\partial \sigma^{ij}}{\partial \alpha^i} + \left[\begin{matrix} j \\ ik \end{matrix} \right] \sigma^{ik} + \left[\begin{matrix} i \\ ik \end{matrix} \right] \sigma^{jk} + f^j \right) \right] dv + \\ & + \iint_{S_1} \delta u_j \sigma^{ij} n_i - t^i \underline{ds} - \iint_{S_u} n_i \delta \sigma^{ij} u_j - u_j^* \underline{ds} - \iint_{S_{c2}} \delta \sigma^{ij} n_i u_j - u_{n2}^* n_j \underline{ds} - \\ & - \iint_{S_{c1}} \delta \sigma^{ij} n_i n_j u_m n^m - \tau^m k_{\tau i} - b^m k_{b i} - u_{n1}^* \underline{ds} + \\ & + \iint_{S_{c1}} \delta u_m \sigma^{sm} n_s - \sigma^{ij} n_i n_j u_m n^m - \tau^m k_{\tau i} - b^m k_{b i} \underline{ds} - \\ & - \iint_{S_{c3}} \delta \sigma^{ij} n_i n_j u_m n^m - u_{n3}^* \underline{ds} + \iint_{S_{c3}} \delta u_j \sigma^{ij} n_i - \sigma^{km} n_k n_m n^j \underline{ds} = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

У випадку коли область контакту S_c невідома, компоненти напружено-деформованого стану мають додатково задовольняти умові недодатності нормальних контактних напружень та умовам непроникнення точок тіла до жорстких штампів:

$$S_c : n_i n_j \sigma^{ij} \leq 0, \quad (10)$$

$$S_t : u_i n^i - \tau^i k_{\tau i} - b^i k_{b i} < u_{n1}^*, u_i n^i < u_{n2}^*, u_i n^i < u_{n3}^*. \quad (11)$$

У цьому випадку визначення області контакту можна здійснити, наприклад, за методом послідовних ітерацій із задовольнянням умов (10, 11). Таким чином, визначення контактних напружень на контактних поверхнях просторових тіл в роботі зведено до пошуку стаціонарної точки мішаного функціоналу Рейсснера, із задовольнянням умов (9-11).

У **третьому розділі** надано метод розв'язання контактних задач теорії пружності, сформульованих у другому розділі роботи, оснований на застосуванні мішаного принципу Рейсснера і варіаційно-структурного методу теорії R-функцій.

Структури розв'язків контактних задач, до яких віднесені компоненти тензору напружень та вектору переміщень, побудовані в **підрозділі 3.1**. Вони задовольняють усім розглянутим в роботі граничним умовам і мають вигляд:

$$\begin{aligned} \sigma^{ij} = & \frac{\omega_{13}}{\omega_{13} + \omega_t} \bar{\mathbf{e}}^i \bar{\mathbf{n}}^j + \tau^j \bar{\mathbf{n}}^i - g^{ij} \bar{\mathbf{e}}^k \bar{\mathbf{n}}_k + \\ & + \tau^i \tau^j \sum_{k=1}^{L_1} A_k \bar{\phi}_k + b^i b^j \sum_{k=1}^{L_2} A_k \bar{\phi}_k + \bar{\mathbf{e}}^i b^j + \tau^j b^i \sum_{k=1}^{L_3} A_k \bar{\phi}_k + \\ & + \left[\bar{\mathbf{n}}^i \bar{\mathbf{n}}^j - \frac{\omega_{t3} \bar{\mathbf{k}}_{t1} \bar{\mathbf{e}}^i \bar{\mathbf{n}}^j + \tau^j \bar{\mathbf{n}}^i + k_{b1} \bar{\mathbf{b}}^i \bar{\mathbf{n}}^j + b^j \bar{\mathbf{n}}^i}{\omega_{t3} + \omega_{c1}} \right] \omega_t \sum_{k=1}^{L_4} A_k \bar{\phi}_k + \omega_{t13} \sum_{k=1}^{M_{ij}} B_k \bar{\psi}_k, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_i = & \frac{\omega_{123}}{\omega_{123} + \omega_u} \mathbf{u}_i^* + \frac{\omega_{u23}}{\omega_{u23} + \omega_{c1}} \bar{\mathbf{n}}_i \mathbf{u}_{n1}^* + \frac{\omega_{u13}}{\omega_{u13} + \omega_{c2}} \bar{\mathbf{n}}_i \mathbf{u}_{n2}^* + \\ & + \frac{\omega_{u12}}{\omega_{u12} + \omega_{c3}} \bar{\mathbf{n}}_i \mathbf{u}_{n3}^* + \left(\frac{\omega_{u2}}{\omega_{u2} + \omega_{13}} \tau_i + \frac{\omega_{u23}}{\omega_{u23} + \omega_{c1}} k_{t1} \bar{\mathbf{n}}_i \right) \sum_{k=1}^{N_1} U_k \bar{\chi}_k + \\ & + \left(\frac{\omega_{u2}}{\omega_{u2} + \omega_{13}} \mathbf{b}_i + \frac{\omega_{u23}}{\omega_{u23} + \omega_{c1}} k_{b1} \bar{\mathbf{n}}_i \right) \sum_{k=1}^{N_2} U_k \bar{\chi}_k + \omega_{u123} \sum_{k=1}^{Q_i} C_k \bar{\vartheta}_k, \end{aligned} \quad (13)$$

де $A_k, s = 1, 4, k = 1, L_s$; $B_k, k = 1, M_{ij}$, $U_k, s = 1, 2, k = 1, N_s$;

$C_k, i = 1, 3, k = 1, Q_i$ - коефіцієнти апроксимації невизначених компонент,

$\phi_k, s = 1, 4, k = 1, L_s$; $\psi_k, k = 1, M_{ij}$, $\chi_k, s = 1, 2, k = 1, N_s$;

$\vartheta_k, i = 1, 3, k = 1, Q_i$ - координатні функції,

$\omega_{13} \bar{\mathbf{e}}^i = 0, \forall \alpha^i \in S_{c1} \cup S_{c3}$, $\omega_t \bar{\mathbf{e}}^i = 0, \forall \alpha^i \in S_t$, $\omega_{t3} \bar{\mathbf{e}}^i = 0, \forall \alpha^i \in S_t \cup S_{c3}$,

$\omega_{c1} \bar{\mathbf{e}}^i = 0, \forall \alpha^i \in S_{c1}$, $\omega_{t13} \bar{\mathbf{e}}^i = 0, \forall \alpha^i \in S_t \cup S_{c1} \cup S_{c3}$,

$\omega_{c2} = 0 \forall \alpha^m \in S_{c2}$, $\omega_{c3} = 0 \forall \alpha^m \in S_{c3}$, $\omega_u = 0 \forall \alpha^m \in S_u$,

$\omega_{123} = 0 \forall \alpha^m \in S_{c1} \cup S_{c2} \cup S_{c3}$, $\omega_{u23} = 0 \forall \alpha^m \in S_u \cup S_{c2} \cup S_{c3}$,

$\omega_{u13} = 0 \forall \alpha^m \in S_u \cup S_{c1} \cup S_{c3}$, $\omega_{u12} = 0 \forall \alpha^m \in S_u \cup S_{c1} \cup S_{c2}$,

$\omega_{u2} = 0 \forall \alpha^m \in S_u \cup S_{c2}$, $\omega_{u123} = 0 \forall \alpha^m \in S_u \cup S_{c1} \cup S_{c2} \cup S_{c3}$ - рівняння дільниць поверхні тіла.

У структурах (12), (13) враховані властивості ортонормованих векторів $\bar{\mathbf{n}}, \bar{\boldsymbol{\tau}}, \bar{\mathbf{b}}$ та відомі властивості R-функцій.

Далі, в **підрозділі 3.2**, для пошуку коефіцієнтів апроксимації невизначених компонент структур (12), (13), які у векторно-матричній формі мають вигляд:

$$\begin{aligned}
\sigma^{11} &= t_*^{11} + A^T \Phi_{\bullet} + B^T \Psi_{\bullet} & \sigma^{22} &= t_*^{22} + A^T \Phi_{\bullet} + B^T \Psi_{\bullet} \\
\sigma^{33} &= t_*^{33} + A^T \Phi_{\bullet} + B^T \Psi_{\bullet} & \sigma^{12} &= t_*^{12} + A^T \Phi_{\bullet} + B^T \Psi_{\bullet} \\
\sigma^{13} &= t_*^{13} + A^T \Phi_{\bullet} + B^T \Psi_{\bullet} & \sigma^{23} &= t_*^{23} + A^T \Phi_{\bullet} + B^T \Psi_{\bullet} \\
u_1 &= u_{1*} + U^T X_{\bullet} + C^T Y_{\bullet} & u_2 &= u_{2*} + U^T X_{\bullet} + C^T Y_{\bullet} \\
u_3 &= u_{3*} + U^T X_{\bullet} + C^T Y_{\bullet}
\end{aligned} \tag{14}$$

отримано визначальні рівняння. Система цих лінійних алгебраїчних рівнянь у блочно-матричній формі має наступний вигляд:

$$\begin{bmatrix} \mathbb{K}_{11} & \mathbb{K}_{12} \\ \mathbb{K}_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_{\sigma} \\ q_u \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} p_{1\sigma} + p_{2\sigma} \\ p_u \end{Bmatrix}. \tag{15}$$

де $q_{\sigma}^T = A^T \quad B^T_{\bullet} \quad B^T_{\bullet} \quad B^T_{\bullet} \quad B^T_{\bullet} \quad B^T_{\bullet} \quad B^T_{\bullet}$,

$q_u^T = U^T \quad C^T_{\bullet} \quad C^T_{\bullet} \quad C^T_{\bullet}$.

У роботі показано, що матриця системи (15) є симетричною, а її головний мінор \mathbb{K}_{11} є від'ємно-визначеною матрицею.

У **підрозділі 3.3** теоретично обґрунтовано збіжність наближених розв'язків стаціонарної точки неекстремального функціоналу Рейсснера, пошук якої здійснюється на класі напружень та переміщень, які задовольняють усім граничним умовам, а невизначені компоненти структур розв'язків обчислюються за допомогою методу Рітца. Встановлено, що у цьому випадку система рівнянь методу Рітца (15) співпадає з системою рівнянь методу Бубнова-Гальоркіна для крайової задачі, відповідної до умови стаціонарності (9) функціоналу Рейсснера. Завдяки цьому, доказ збіжності наближених розв'язків розглянутих в роботі задач можна здійснити за допомогою відомої достатньої ознаки збіжності методу Бубнова-Гальоркіна, яка у подальшому в роботі вважається виконаною.

У **четвертому розділі** на основі розрахункових даних досліджено внутрішню збіжність розв'язків просторових крайових задач теорії пружності, які отримані за допомогою запропонованого методу із застосуванням створеного програмного забезпечення.

У **підрозділі 4.1** для оцінки точності наближених розв'язків, отриманих при обмеженій кількості координатних функцій в їхніх структурах, використано умови рівності між підрахованими на цих розв'язках функціоналами Лагранжа, Кастиліано та Рейсснера. З метою обґрунтування таких оцінок в роботі розглянуто задачу мінімізації функціоналу Лагранжа та збурення цієї задачі у вигляді:

$$\Phi = \frac{1}{2} \iiint_V c^{ijkl} \epsilon_{ij} \epsilon_{kl} + p_{ij} \epsilon_{kl} + p_{kl} \epsilon_{ij} dv - \iiint_V u_i f^i dv - \iint_{S_u} u_i t^i ds. \tag{16}$$

Відомо, що двоїстою до задачі мінімізації функціоналу Лагранжа відносно збурення (16) буде задача максимізації функціоналу Кастиліано на класі статично можливих напружень. В роботі пока-

зано, що функціонал (16) є строго опуклим та кофінітним відносно p_{ij} при будь якому u_i . З урахуванням цього отримано лагранжіан задачі мінімізації функціонала Лагранжа відносно збурення (16) і показано, що він збігається із функціоналом Рейсснера, який визначено на класі кінематично можливих переміщень. Завдяки цьому, на підставі відомих теорем опуклого аналізу встановлено, що стаціонарні значення функціоналів Лагранжа, Кастиліано та Рейсснера співпадають між собою.

У **підрозділі 4.2** варіаційне рівняння (9) конкретизовано відповідно до циліндричної системи координат, що доцільно при розв'язанні контактних задач для осесиметрично навантажених тіл обертання, якими моделюють ущільнювальні елементи сучасних конструкцій затворів високого тиску. Далі наведено результати розрахунків, які отримано при розв'язанні тестових задач. Спочатку розглянуто циліндри скінченої довжини з вільними торцями та з торцями, затиснутими між гладкими жорсткими стінками, при дії постійних внутрішнього та зовнішнього тисків. Данні про збіжність результатів для циліндра з вільними торцями наведені в табл. 1. За прийнятими оцінками встановлено збіжність наближених розв'язків, та їхню відповідність до відомих аналітичних розв'язків. Окремі результати розрахунків порівняно з наведеними у літературі розв'язками, отриманими за допомогою МСЕ. Між ними також встановлено добру узгодженість. Для нескінченного циліндра (задача Ляме) встановлено збіжність наближених розв'язків з аналітичними розв'язками. Досліджено вплив точності, з якою обчислені коефіцієнти рівнянь (15), на точність наближених розв'язків, що отримані за створеним в роботі методом. Встановлено, що для підвищення точності наближених розв'язків разом із збільшенням кількості координатних функцій потрібно підвищити точність підрахування коефіцієнтів системи рівнянь (15).

Таблиця 1

Дані із збіжності наближених розв'язків для циліндра з вільними торцями

| Вид функціоналу | Кількість координатних функцій, N | | | Аналітичний розв'язок |
|-----------------|-----------------------------------|--------|--------|-----------------------|
| | N = 1 | N = 3 | N = 8 | |
| Кастиліано, Дж | -2.028 | -2.357 | -2.359 | -2.359 |
| Рейсснера, Дж | -2.028 | -2.357 | -2.359 | -2.359 |
| Лагранжа, Дж | -1.446 | -2.347 | -2.359 | -2.359 |

Наприкінці підрозділу розглянуто задачу з невідомою областю контакту для циліндра, який стискається гладким штампом. Пошук області контакту здійснено за допомогою послідовних ітерацій. Встановлено збіжність ітераційного процесу, за яким умова невід'ємності контактного тиску виконувалась після чотирьох ітерацій (рис.1, $i = 4$), а умова непроникнення - на кожній ітерації. Розв'язки для кожної ітерації оцінювались за прийнятим критерієм, а точність розміру області контакту вивчалася за допомогою відомої властивості максимуму стискаючої контактної сили. На кожній ітерації розв'язки були отримані з високою точністю, та визначений розмір області контакту відповідав максимуму стискаючої сили.

Рис.1. Контактні напруження

Рис. 2. Трикутне ущільнення

У п'ятому розділі наведені результати розрахунків контактних напружень для кільцевих ущільнень зі складною формою перерізу, які використовують в затворах високого тиску.

Результати розрахунків для широко розповсюдженого ущільнення з компенсованою площею трикутного перерізу (рис. 2) із типовими конструктивними параметрами наведені в підрозділі 5.1. Спочатку розглянуто задачу для кільця, яке взаємодіє зі стінками затвору - АВ та АС при повному зчепленні. Дані про збіжність наближених розв'язків при збільшенні кількості координатних функцій - N надані в табл. 2. Для контактних тисків результати швидко збігалися із збільшенням кількості координатних функцій. У основній області тіла значення інтенсивності напружень Мізеса виявилися нижчими границі текучості для сталі 20, яка застосовується для розглянутого ущільнення. Незначне перевищення границі текучості виявлено лише поблизу точок В та С.

Таблиця 2

Дані із збіжності наближених розв'язків для трикутного ущільнення

| Вид функціоналу | Кількість координатних функцій, N | | |
|-----------------|-----------------------------------|---------|---------|
| | N = 1 | N = 3 | N = 8 |
| Кастиліано, Дж | -0.1863 | -0.1740 | -0.1731 |
| Рейсснера, Дж | -0.1863 | -0.1740 | -0.1731 |
| Лагранжа, Дж | -0.1139 | -0.1593 | -0.1696 |

Далі розглянуто теж саме кільцеве ущільнення при взаємодії із гладкими стінками затвору - АВ та АС (рис. 2). Для цього випадку також досліджено збіжність розв'язків за прийнятими оцінками. Встановлено, що контактні тиски значно перевищують тиск робочого середовища, а рівні інтенсивності напружень Мізеса виявилися нижчими границі текучості. Порівнянням результатів розрахунків трикутного ущільнення при повному зчепленні та при гладких стінках затвору встановлено, що дотичні напруження значно знижують рівень контактного тиску, тому слід рекомендувати зменшувати шорсткість ущільнювальних поверхонь.

Результати досліджень кільцевого ущільнення з некомпенсованою площею (рис. 3, 4) надано в підрозділі 5.2.

Рис. 3. Схема затвору

Рис. 4. Геометрія ущільнення

Таке ущільнення використовується в затворі газостатичних установок високого тиску із рівнем тиску робочого середовища $p_1 = 400$ МПа, має діаметр $D_0 = 150$ мм, ширину $b = 5$ мм та виготовляється із берилієвої бронзи БрБ2. Під дією тиску робочого середовища ущільнювальне кільце - 3 притискується до стінок пробки-обтюратора - 2 та корпусу газостату - 1, і завдяки створеним контактним тискам забезпечується герметичність газостату. Досліджено вплив параметрів

перерізу кільця (рис. 4), висоти кільця - h , кутів нахилу навантажувальній поверхні АВ - α та опорної поверхні AD - φ , на рівень контактної тиску. Визначено вплив на контактні тиски дотичних контактних напружень, які виникають на опорних поверхнях ВС та AD кільця при його зчепленні зі стінками затвору.

Встановлено, що при збільшенні висоти кільця контактні тиски зменшуються, що для випадку $\alpha = 18^\circ$, $\varphi = 45^\circ$ ілюстровано на рис. 5, де p_3 - нормальні контактні напруження на стороні AD, значення відносної координати $x = -1$ відповідає точці А, а значення $x = 1$ - точці D.

Рис. 5. Вплив висоти кільця на контактні напруження

Рис. 6. Вплив кута φ на контактні напруження

Вплив дотичних контактних напружень на рівень контактної тиску встановлено при порівнянні результатів розрахунків, отриманих для ущільнювального кільця з $\alpha = 0$ при його взаємодії з гладкими стінками затвору та при повному зчепленні ущільнювальних поверхонь. Встановлено, що при взаємодії з гладкими стінками збільшення кута φ зменшує контактні тиски, але, навіть при $\varphi = 45^\circ$, їх рівні перевищують тиск робочого середовища (рис. 6). Показано, що при повному зчепленні контактні тиски на сторонах ВС та AD значно нижчі за тих, які встановлені при взаємодії з гладкими стінками затвору. Тому форму перерізу кільця доцільно вибирати такою, щоб необхідний рівень контактної тиску забезпечувався навіть у найбільш несприятливому випадку повного зчеплення ущільнювальних поверхонь. Розрахунки ущільнювальних кілець з нахилою навантажувальною гранню показали, що при збільшенні кута α до 30° контактні тиски істотно збільшуються при будь-якому значенні кута φ з інтервалу $(25^\circ-45^\circ)$ і перевищують рівень робочого тиску навіть при повному зчепленні та при $\varphi = 45^\circ$ (рис. 7).

Рис. 7. Вплив кута α на контактні напруження

Рис. 8. Контактні напруження при робочому тиску $p_1 = 800$ МПа

Довжину ділянки повного зчеплення при наявності сил сухого тертя із сталим коефіцієнтом f визначено проміжком від'ємності наступних функцій:

$$q_2^* = |q_2| - f|p_2|, \quad q_3^* = |q_3| - f|p_3|, \quad (17)$$

де q_2, q_3 - дотичні контактні напруження на сторонах ВС та AD,

p_2, p_3 - нормальні контактні напруження на сторонах ВС та AD.

Для розглянутих в роботі ущільнень загальна довжина ділянок зчеплення виявились значно меншою довжини твірних контактних поверхонь.

У роботі виконано перевірочні розрахунки бронзового ($p_1 = 800$ МПа) і сталевго ($p_1 = 1000$ МПа) ущільнювальних кілець. Встановлено, що при $\alpha = 18^\circ$, $\varphi = 45^\circ$, $h/b = 0.75$ розподіли контактних напружень практично збігаються на обох сторонах кільця, та контактні тиски мають достатньо високий рівень. В окремих точках контактних поверхонь ущільнень затвору ці рівні перевищували тиск робочого середовища більш ніж у 2 рази (рис. 8).

За розрахунковими даними контактних напружень встановлювалась збіжність наближених розв'язків із різною кількістю координатних функцій. Показано, що при збільшенні кількості координатних функцій суттєво зменшується різниця між значеннями функціоналів Лагранжа, Кастиліано і Рейсснера. Для перевірочних розрахунків ці дані наведені у табл. 3.

Таблиця 3

Дані із точності розв'язків при різній кількості координатних функцій

| Вид функціоналу | Загальна кількість координатних функцій | | |
|-----------------|---|-------|-------|
| | 54 | 198 | 684 |
| Кастиліано, Дж | -0.98 | -0.91 | -0.86 |
| Рейсснера, Дж | -0.89 | -0.81 | -0.77 |
| Лагранжа, Дж | 7.16 | 9.61 | -0.76 |

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

На основі одержаних в роботі результатів зроблено наступні висновки:

1. Проведено огляд наявних у літературі публікацій за темою роботи, за яким зроблено висновок, що досліджень з актуальної для практики проблеми розрахунку ущільнень затворів високого тиску недостатньо. В існуючих за темою роботи розробках, зокрема для ущільнень з некомпенсованою площею, сьогодні практично відсутні адекватні моделі та методи розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів.
2. Створено новий метод розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску на основі мішаного варіаційного принципу Рейсснера та розв'язання крайових задач теорії пружності для тривимірних і двовимірних пружних тіл складної форми варіаційно-структурним методом теорії R-функцій. На відміну від розповсюджених методів, наприклад МСЕ, розроблений метод дозволяє здійснювати незалежну апроксимацію напружень і переміщень та здатний точно задовольнити умовам щільного контакту взаємодіючих поверхонь.
3. Сформульовано варіаційні постановки контактних задач теорії пружності для просторових тіл на основі мішаного принципу Рейсснера у довільних криволінійних координатах. Для формулювання умов контакту тіла зі штампом нормальні переміщення точок деформованого тіла під штампом виражені в формі аналітичної залежності від функції рівняння поверхні штампа загального виду.

4. Запропоновано структури розв'язків мішаних контактних задач теорії пружності відповідні варіаційно-структурному методу теорії R-функцій для пошуку стаціонарної точки мішаного функціоналу Рейсснера. Отримано системи лінійних алгебраїчних рівнянь, за розв'язанням яких встановлюються коефіцієнти апроксимації невизначених компонентів у цих структурах. Показано, що матриці таких систем є симетричними та збігаються із відповідними матрицями методу Бубнова-Гальоркіна. За допомогою відомої достатньої ознаки збіжності методу Бубнова-Гальоркіна теоретично обґрунтовано внутрішню збіжність послідовностей наближених розв'язків задачі.
5. Запропоновано та обґрунтовано критерій для оцінки точності наближених розв'язків рівняння стаціонарності функціоналу Рейсснера за ступенем рівності між підрахованими на цих розв'язках функціоналами Лагранжа, Кастиліано і Рейсснера, значення яких точно збігаються лише в точках стаціонарності.
6. Розроблено програмне забезпечення для вивчення напружено-деформованого стану осесиметрично навантажених тіл обертання, стосовно до аналізу напружено-деформованого стану ущільнень затворів високого тиску при їхньої взаємодії із твердими тілами. Виконано числове дослідження збіжності запропонованого методу із застосуванням прийнятої в роботі оцінки точності наближених розв'язків. Встановлено добру узгодженість між розв'язками, отриманими для тестових задач, із відомими в літературі їхніми аналітичними та числовими розв'язками.
7. Для кільцевих ущільнень із трикутним перерізом, які широко застосовують для герметизації промислових посудин високого тиску, виконано розрахунки контактних напружень на їхніх ущільнювальних поверхнях. Отримані дані не суперечать наведеним в літературі опитним та нормативним даним, що підтверджує вірогідність створеного в роботі методу для визначення контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску.
8. Виконано прикладні розрахунки кільцевого ущільнення з некомпенсованою площею із чотирикутним перерізом, яке застосовується для герметизації затвору газостатичної установки високого тиску в ІФТТМТ ННЦ "ХФТІ". Отримані розрахункові дані дозволили надати рекомендації щодо вибору конструктивних параметрів таких ущільнень, за якими забезпечується гарантований рівень контактного тиску, необхідний для герметизації затвору.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗА МАТЕРІАЛАМИ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

1. Ромашов Ю.В., Сало В.А. Двусторонняя оценка решений смешанных вариационных задач теории упругости // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 36. - С. 131-134.
2. Ромашов Ю.В., Сало В.А. Достаточный признак сходимости метода Ритца для смешанного вариационного принципа Рейсснера теории упругости // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 85. - С. 22-26.

3. Ромашов Ю.В., Сало В.А. Метод двусторонней оценки численных решений задач теории упругости, полученных при помощи функционала Рейсснера // Динамика и прочность машин. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 53. - С. 25-30.
4. Морачковский О.К., Ромашов Ю.В., Сало В.А. О методе двусторонней оценки решений смешанных вариационных задач теории упругости // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье. - Харьков: ХГПУ. - 1999. - Вып. 7, Ч.1. - С. 322-326.
5. Ромашов Ю.В., Сало В.А. О корректной формулировке краевых условий контактного взаимодействия жесткого штампа с упругим телом // Динамика и прочность машин. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. 57. - С. 11-15.
6. Бирюков О.В., Ромашов Ю.В. Метод расчета контактных напряжений на поверхностях уплотнительных элементов затворов высокого давления // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. 116. - С. 29-32.
7. Бирюков О.В., Ромашов Ю.В. Анализ эффективности уплотнений с некомпенсированной площадью в затворах высокого давления // Вісник Інженерної академії України. - 2000. - Спеціальний випуск (Інформація по 2-й міжнародній науково-технічній конференції "Физические и компьютерные технологии в народном хозяйстве"). - С. 387-390.
8. Ромашов Ю.В. Решение контактных задач теории упругости на основе вариационно-структурного метода для смешанного функционала Рейсснера // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. - Харьков: ХГПУ. - 2000. - Вып. 95. - С. 65-69.

АНОТАЦІЯ

Ромашов Ю.В. Розробка методу розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 - динаміка та міцність машин. - Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2001.

У дисертації розроблено метод розрахунку контактних напружень на ущільнювальних поверхнях затворів високого тиску на основі розв'язання просторових контактних задач теорії пружності за варіаційно-структурним методом теорії R-функцій для мішаного функціоналу Рейсснера. Побудовано структури розв'язків, які точно задовольняють граничним умовам контактної задачі. Коефіцієнти в апроксимаціях невизначених компонент цих структур отримано розв'язанням побудованої системи Рітца, властивості якої досліджено в роботі. Запропоновано та обґрунтовано оцінки точності наближених розв'язків, які використано для встановлення збіжності наближених розв'язків розглянутих задач. Здійснено розрахунки кільцевих ущільнень затворів. Для ущільнення з некомпенсованою площею затвору газостатичної установки отримано дані щодо впливу параметрів перерізу кільця на рівень контактного тиску.

Ключові слова: ущільнення затворів, розрахунки контактних напружень, мішаний варіаційний принцип, варіаційно-структурний метод, оцінки точності наближених розв'язків.

ABSTRACT

Romashov Y.V. Elaboration of the contact stresses calculating method for the high-pressure vessels seals. - Manuscript.

Thesis for a candidate of technical sciences degree by the speciality 05.02.09 - dynamics and strength of machines. - National Technical University "Kharkov Polytechnical Institute", Kharkov, 2001.

The contact stresses calculating method for the high-pressure vessels seals is elaborated in this work. This method based on the theory of elasticity contact problems solving by R-functions method and Reissner's mixed variational principle. The structures of solutions identically satisfied contact problem boundary conditions are built in this work. The coefficients of indefinite structures components approximations are obtained by Ritz systems solving. These systems are built and its properties are investigated. The new estimations of numerical solutions accuracy are proposed. These estimations are used for the approximate solutions convergence determining. The contact stresses for some high-pressure vessels fixed-point seal rings are evaluated. The influence of cross section geometry on the contact pressures is researched for seal rings with quadrangle cross section likeness Bridgman's type. The results of this research are used for high-pressure vessels seals designing.

Key words: high-pressure vessels seals, contact stresses calculating methods, mixed variational principle, method of variational structures, approximate solution estimation.

АННОТАЦИЯ

Ромашов Ю.В. Разработка метода расчета контактных напряжений на уплотнительных поверхностях затворов высокого давления. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 - динамика и прочность машин. - Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2001.

В диссертации разработан новый метод расчета контактных напряжений на уплотнительных поверхностях затворов высокого давления. Он основан на решении двумерных и трехмерных задач теории упругости для тел сложной формы, взаимодействующих с абсолютно жесткими штампами. Решение таких задач осуществлено при помощи вариационно-структурного метода теории R-функций и смешанного принципа Рейсснера.

В работе на основе смешанного вариационного принципа Рейсснера математически сформулированы пространственные контактные задачи теории упругости для тел, взаимодействующих с жесткими штампами. Для формулировки условий контакта тела и штампа перемещения точек деформированного тела под штампом представлены в виде аналитических зависимостей от функции уравнения поверхности штампа общего вида.

Для решения пространственных контактных задач теории упругости в диссертации построены структуры решений для компонент тензора напряжений и вектора перемещений, удовлетворяющие граничным условиям контактной задачи. Коэффициенты аппроксимации неопределенных компонент этих структур получены решением построенной в работе системы Ритца. Подробно исследованы свойства матрицы этой системы и установлено, что при соответствующей нумерации неизвестных она будет симметричной, и один из ее главных миноров будет отрицательно определенной матрицей. В работе показано, что для доказательства сходимости получаемых приближенных решений можно использовать известный достаточный признак сходимости метода Бубнова-Галеркина для краевых задач, операторы которых не являются положительно-определенными.

В работе выполнено численное исследование сходимости метода решения контактных задач. Предложены и обоснованы новые оценки точности приближенных решений по степени равенства между подсчитанными на этих решениях функционалами Лагранжа, Кастильяно и Рейсснера, значения которых совпадают только в стационарных точках. Показано хорошее соответствие полученных решений тестовых задач для толстостенных цилиндров с известными в литературе аналитическими и численными решениями. Установлено, что при малой разнице между значениями функционалов Лагранжа, Кастильяно и Рейсснера получаемые решения совпадают с известными аналитическими решениями во всех точках исследуемого тела. Исследования показали, что при увеличении числа координатных функций необходимо также увеличивать точность вычисления коэффициентов разрешающих уравнений. На примере задачи о взаимодействии цилиндра с гладким осесимметричным штампом показано, что разработанный метод может эффективно применяться для решения задач с неизвестной областью контакта. Размер области контакта в рассмотренном примере определялся итерационно, точность решения линейных задач на каждом шаге итераций определялась при помощи предложенных оценок, а решение для области контакта проверялось с помощью известного принципа максимума прижимающей контактной силы.

В диссертации выполнены расчеты кольцевых уплотнений. Для кольцевых уплотнений треугольного сечения, которые широко применяют для герметизации промышленных сосудов высокого давления, выполнены расчеты контактных напряжений на уплотнительных поверхностях. Расчеты показали, что при полном сцеплении точек кольца со стенками контактные давления оказываются ниже, чем при взаимодействии кольца с абсолютно гладкими стенками корпуса и крышки сосуда. Аналогичный результат получен и для кольцевого уплотнения с некомпенсированной площадью, сечение которого представляет неправильный четырехугольник, применяемого для герметизации затвора газостатических установок высокого давления. Для такого кольца исследовано влияние геометрических параметров сечения на уровень контактного давления на уплотнительных поверхностях затвора. Установлено, что при увеличении угла наклона опорной

границы и высоты уплотнительного кольца контактные давления снижаются, а при увеличении угла наклона нагрузочной грани - возрастают. Результаты этих исследований использованы в Институте физики твердого тела, материаловедения и технологий Национального научного центра "Харьковский физико-технический институт" при проектировании уплотнения затвора газостатических установок высокого давления.

Ключевые слова: уплотнения затворов, расчет контактных напряжений, смешанный вариационный принцип, вариационно-структурный метод, оценки точности приближенных решений.

Відповідальний за випуск к. т. н., доцент Аврамов К.В.

Підп. до друку 07.08. 2001 р. Формат видання 145×215.

Формат паперу 60×90/16. Папір Могра. Друк - ризографія.

Обсяг 0.9 авт. арк. Тираж 100 прим. Зам. № 231

Видавничий центр НТУ "ХП". Свідоцтво ДК № 116 від 10.07.2000 р.

Друкарня НТУ "ХП", 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21
