

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ
Київський державний технічний університет
будівництва і архітектури

На превах рукопису

КАНДИДАТ-СИМЬОВА ВАЛЕРІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА



УДК 539.3

ЧИСЕЛЬНО-АНАЛІТИЧНИЙ МЕТОД ПОТЕНЦІАЛУ ДЛЯ
ПРОСТОРОВИХ СКЛАДЕНИХ ОБ'ЄКТІВ З ВИРІЗАМИ

05.23.17 - Будівельна механіка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ - 1995



Дисертація є рукописом.

Роботу виконано на кафедрі будівель і споруд аеропортів Київського міжнародного університету цивільної авіації.

Науковий керівник - доктор технічних наук,
професор Верижський Ю.В.

Офіційні опоненти - доктор фізико-математичних
наук Галанов Б.О.

кандидат технічних наук,
доцент Штефан Є.В.

Провідна організація - Інститут проблем міцності
НАН України

Захист відбудеться "24" *березня* 1995 року о 13 годині на засіданні спеціалізованої ради К 068.05.04 в Київському державному технічному університеті будівництва і архітектури (252037, Київ 37, Повітрофлотський проспект, 31).

З дисертацією можна ознайомитися в науковій бібліотеці Київського державного технічного університету будівництва і архітектури.

Автореферат розіслано "24" *лютого* 1995 року.

Вчений секретар спеціалізованої
ради, кандидат технічних наук

Кушніренко М.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Для забезпечення надійності, економічності та довговічності відповідальних інженерних конструкцій та споруд їхні схеми при дослідженнях міцності повинні найбільш повно відповідати реальним умовам виготовлення, монтажу та експлуатації об'єктів. У зв'язку з цим доцільно використовувати комплексний підхід, дозволяючий урахувати сумісну роботу елементів складеної конструкції. Тому розширення області застосування чисельно - аналітичного методу потенціалу (ЧАМП), дозволяючого досліджувати узагальнений напружено - деформований стан складеної конструкції, а також локальні ефекти в зонах сполучення елементів та в місцях ініціювання тріщин, є актуальною науковою проблемою.

Мета даної роботи полягає в наступному:

- розвиток ЧАМП для розрахунку складених просторових конструкцій, що складаються з масивних підконструкцій довільної форми, на статичні навантаження;

- побудова послідовності розривних граничних елементів високого порядку;

- побудова універсального алгоритму розв'язання граничної задачі для складених об'єктів на основі використання дискретних аналогів формул Соміліана при різних типах апроксимації функцій напружень та переміщень у рамках плоских граничних елементів;

- розробка методики аналітичного обчислення інтегральних коефіцієнтів для довільних видів апроксимації функцій густини еластопотенціалів;

- реалізація розроблених методик і алгоритму у вигляді пакета прикладних програм, орієнтованого на IBM PC та сумісні з ними персональні комп'ютери;

- застосування розробленої методики та пакету прикладних програм для дослідження об'єктів із наскрізними та нескрізними вирізами довільної форми;

- дослідження за допомогою розробленого пакету реальних конструкцій.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- розвиток чисельно-аналітичного методу потенціалу для складених просторових систем;

- удосконалення алгоритму розв'язання граничної задачі

для складених конструкцій;

- отримання аналітичних формул для обчислення регулярних і нерегулярних інтегральних коефіцієнтів розв'язуючих рівнянь з урахуванням довільного закону апроксимації густини еластопотенціалів;

- дослідження поведінки функцій напружено-деформованого стану при наявності вирізів у масивних просторових тілах;

Вірогідність отриманих результатів забезпечується вибором достатньо обґрунтованого і апробованого методу чисельного аналізу, точністю математичних викладок, співставленням чисельних результатів розв'язання тестових задач з аналітичними рішеннями, з результатами, отриманими іншими чисельними методами, а також при збільшенні кількості фрагментів дискретизації поверхні досліджуваних об'єктів.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в реалізації розробленої методики обчислення складених просторових конструкцій у вигляді пакета прикладних програм, дозволяючого з високим ступенем автоматизації проводити чисельні дослідження напружено-деформованого стану масивних елементів будівельних та машинобудівних конструкцій, з урахуванням локальних дефектів, обумовлених виготовленням та експлуатацією, в умовах дії статичних навантажень.

Дисертаційну роботу виконано відповідно із загальним планом наукових досліджень кафедри будівель і споруд аеропортів Київського міжнародного університету цивільної авіації під керівництвом доктора технічних наук, професора Ю.В.Веружського.

Апробація роботи. Основні результати дисертації доповідалися та обговорювалися на конференціях: Всесоюзна конференція по статичі та динаміці просторових конструкцій, Київ, 1985; Всесоюзна науково-технічна конференція, Київ, 1991; Міжнародний семінар з методу граничних елементів, Санкт-Петербург, 1993, 1994.

Публікації. По темі дисертації опубліковано 4 наукових п.ці.

Особистий внесок дисертанта полягає в розробці чисельно-аналітичної методики, що дозволяє виконувати аналіз просторових складених об'єктів на статичні навантаження, враховуючи наявність вирізів, обумовлених виготовленням та експлуатацією конструкції.

Об'єм роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, заключення, списку літератури та додатку; складає 148 сторінок друкарського тексту, містить 17 таблиць і 32 малюнки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі міститься аналіз публікацій, що дозволяє обґрунтувати актуальність теми, формулюється наукова новина та практична цінність роботи, наведено короткий зміст розділів дисертаційної роботи. Зокрема наголошується, що для дослідження складених об'єктів з урахуванням локальних ефектів, виникаючих в процесі взаємодії окремих елементів конструкції, доцільно використовувати чисельно-аналітичний метод потенціалу (ЧАМП). Це обумовлено накопиченим досвідом ефективного застосування ЧАМП і програмних засобів його реалізації "Потенціал" для розв'язання просторових проблем будівельної механіки. Перспективи суперелементного підходу в методі потенціалу пов'язуються з подальшим розвитком його можливостей для дослідження тріщинообразних дефектів (вирізів) узагальненої конфігурації фронту, виникаючих в різних конструкційних елементах. Виконаний огляд публікацій відносно класифікації типів руйнування дозволив зробити висновок про те, що на практиці найнебезпечнішим типом руйнування є руйнування сколом, що призводить до нестійкого характеру розвитку тріщин. В умовах низьких температур і великих ступенів деформування ймовірність початку крихкого руйнування збільшується. Наголошено, що більшість теорій, вивчаючих механізм руйнування сколом, використовують локальні критерії руйнування, вимагаючи достатньо точного уявлення про поля напружень та переміщень в окілї вершини вирізу. Як правило, воно не може бути отримано засобами неруйнівного контролю. В цих умовах великого значення набувають чисельні методи аналізу. Наведений огляд чисельних методів, що застосовуються для аналізу тіл з вирізами, показує, що кожний з них є обумовленим або розмірністю задачі, або формою вирізу та передумовами поведінки функцій НДС поблизу фронту вирізу. В даній роботі обчислення об'єктів з вирізами засновано на узагальненому підході просторового модифікованого аналізу ЧАМП. Запропонований підхід не накладає ніяких обмежень на

конфігурацію вирізу. Розв'язання виконується з позицій лінійної теорії пружності при малих деформаціях для ізотропних кусочно-однорідних тіл в просторовій постановці. Не береться до уваги змикання берегів вирізу і плин берегів вирізу відносно один одного.

В першому розділі наведені основні співвідношення лінійної теорії пружності для ізотропних просторових об'єктів. Об'єкти розподіляються на підконструкції, для кожної з яких незалежно формується інтегральні співвідношення методу потенціалу. Зв'язок між підконструкціями на поверхнях контакту забезпечується рівняннями рівноваги і умовами сполучення. За фундаментальне використано рішення Кельвина про дію одиничної зосередженої сили в безкінечному пружному середовищі.

Другий розділ присвячено питанням формування дискретних аналогів інтегральних рівнянь на основі використання розривних граничних елементів високих порядків. Дискретні аналоги інтегральних рівнянь, без урахування масових інтегралів, приймають вигляд:

$$\begin{aligned}
 U_j(K) &= \int_{V_m} \chi_i U_{ji}^* dV + \sum_{q=1}^M \left[\int_{S_m^q} P_i U_{ji}^* dS - \int_{S_m^q} P_{ji}^* U_i dS \right] \\
 &+ \sum_{q=1}^{M1} \sum_{k=1}^{M2} \left[\int_{S_{mk}^q} P_i U_{ji}^* dS - \int_{S_{mk}^q} P_{ji}^* U_i dS \right] \\
 \sigma_{kj}(K) &= \int_{V_m} \chi_i U_{kji}^* dV + \sum_{q=1}^M \left[\int_{S_m^q} P_i U_{kji}^* dS - \int_{S_m^q} P_{kji}^* U_i dS \right] + \\
 &+ \sum_{q=1}^{M1} \sum_{k=1}^{M2} \left[\int_{S_{mk}^q} P_i U_{kji}^* dS - \int_{S_{mk}^q} P_{kji}^* U_i dS \right]
 \end{aligned}$$

де M - кількість граничних елементів на зовнішніх ділянках S_m границі; $M1$ - кількість граничних елементів на ділянках сполучення S_{mk} , $M2$ - кількість підобластей, що мають поверхні сполучення з V_m . Функції переміщень та зусиль на границі апроксимуються поліномами довільного степеню. Значення функцій переміщень та зусиль в будь-якій точці граничного елемента визначається через їх значення в інтерполяційних вузлах.

Використовуються граничні елементи з внутрішніми вузлами інтерполяції, розміщеними у вузлах Гауса. Інтерполяційні функції φ_{ξ} визначаються як многочлен впливу вузла з координатами (n_2^{ξ}, n_3^{ξ}) :

$$\varphi_{\xi}(n_2, n_3) = \det\{\omega_{\xi}(n_2, n_3)\} / \det\{\omega_{\xi}(n_2^{\xi}, n_3^{\xi})\}$$

В явній формі вирази для інтерполяційних функцій мають вигляд:

$$\varphi_{\xi}(n_2, n_3) = \{N^C\} [A_j^{\xi}]$$

де A_j^{ξ} - коефіцієнти в розкладі, N^C - послідовність значень базисних функцій.

В даній роботі розроблено аналітичну методику обчислення інтегральних коефіцієнтів розв'язуючих співвідношень, побудованих на основі використання розривних граничних елементів високих порядків. Інтегральні коефіцієнти, з урахуванням виразів для інтерполяційних функцій, мають вигляд:

$$I(n_1, n_2, n_3) = \iint_S \{N^C\} f^*(n_1, n_2, n_3) dS \{A\}.$$

В загальному випадку вони складаються з елементів:

$$\iint_{S_m} \frac{n_1^p n_2^q n_3^r}{r^t} dS.$$

де S - площина чотирикутника (трикутника) S_m , n_1 - константа, за умовами вибору локальної системи координат, $f(n_1, n_2, n_3)$ - узагальнена форма запису функцій фундаментального рішення. Методику створено на основі використання рекурентних співвідношень для пониження степеню підінтегральних функцій. Для дослідження інтегралів з особливостями в даній роботі запропоновано спосіб граничного переходу при $n_1=0$, що спирається на запропоновану методику інтегрування, розроблену для регулярних інтегралів. Такий підхід дозволяє виконувати інтегрування в замкнутій формі як по трикутним і чотирикутним граничним елементам, що мають особливу точку, так і по граничним елементам, що лежать з нею в одній площині. Запропонований спосіб граничного переходу вивчається на прикладі квадратичного закону апроксимації.

В третьому розділі розглянуто методику реалізації методу потенціалу для просторових складених об'єктів з використанням

алгоритму формування і розв'язання систем лінійних алгебраїчних рівнянь з розрізними матрицями. В роботі використано алгоритм, передбачаючий умовне розподілення складеного об'єкту на підобласті (елементи) за ознаками однорідності геометрії, граничних умов і фізико-механічних властивостей матеріалу конструкції. Наскрісні та нескрісні вирізи довільної конфігурації вивчаються як порушення геометричної однорідності об'єкту, тому в процесі поділу на суперелементи поверхні вирізу і його продовження довільного напрямку обов'язково визначають фрагменти границі суперелементу. В такій інтерпретації продовження вирізу визначає поверхню контакту двох підобластей. В загальному випадку на продовженні вирізу задається ідеальний контакт. Формування розв'язуючих систем рівнянь відтворюється незалежно для кожної підобласті, а їх збірка виконується за допомогою системи рівнянь, яка з'єднує невідомі у зв'язках контакту на поверхнях сполучення підобластей.

Дано опис пакету прикладних програм, який реалізує розроблену методику. Аналіз якості запропонованого методу аналізу, заснованого на суперелементному підході з розривними граничними елементами високого степеню, запроваджено на ряді тестових задач, характерних для аналізу якості обчислювальних алгоритмів. В даному контексті задачі про згин консольної балки та про брус великої кривизни являють інтерес з точки зору своєї фактичної одномірності. Задачі вивчалися як в простій, так і в суперелементній постановці.

Згин консольної балки довжиною L , з квадратним перерізом стороною b , навантаженої у торці дотичними розподіленими зусиллями, вивчається в просторовій постановці. Погрішність розв'язання оцінювалася згідно з величиною прогибу кінця балки при різноманітних значеннях параметру L/b та різноманітних типах граничних елементів. Погрішність обчислення для найбільшої розглянутої довжини балки, $L/b=95$, дорівнювала 2.13%. Наведено дослідження рівноваги балки в різних перерізах.

Кривий брус великої кривизни $\eta/\kappa=1/5$ (сектор 180°) з квадратним перерізом навантажено у торці розподіленими дотичними зусиллями одиничної інтенсивності. Погрішність обчислення оцінювалася згідно з величиною перемішень центру торцевого фрагменту, а також згідно з величинами нормальних напружень в

перерізах брусу. Висока точність досягалася на достатньо
грубій сітці, з погрешністю обчислення, що не перевищує 1%.
Описано краєві ефекти в закріпленні.

Можливості застосування розробленого комплексу для
дослідження задач, що характеризуються кусочною однорідністю
фізико-механічних властивостей матеріалу, були досліджені при
розв'язанні проблеми про безкінечний складений циліндр. Він
досліджувався як просторовий об'єкт, що являє собою жорсткий
зв'язок циліндричної обойми та циліндричного вкладишу, які
мають різні фізико-механічні властивості. Циліндр знаходиться
в умовах дії радіальних розтягуючих зусиль на зовнішній повер-
хні обойми. Розрахунки виконувалися без урахування вісєвої
симетрії. З метою аналізу вивчався сектор в 10° . Поверхні
вкладишу і обойми апроксимуються 9-вузловими граничними
елементами. Було виконано дві групи постановок для різних
співвідношень фізико-механічних констант матеріалів вкладиша
та обойми. Для першої групи постановок приймалося: $\nu_B = \nu_O = 0.3$,
 $E_B/E_O = 10000, 10, 1, 0.1, 0.0001$. Друга група постановок
виконувалася при таких співвідношеннях фізико-механічних ха-
рактеристик матеріалу вкладиша та обойми: $E_B/E_O = 1$;
 $\nu_B/\nu_O = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$. Відносна погрешність обчислення
компонент напружено-деформованого стану дорівнювала, в
середньому, 0.2%.

В четвертому розділі вивчаються об'єкти із наскрізними та
некрізними вирізами різної конфігурації на основі
суперелементного підходу з використанням 9-вузлових розривних
граничних елементів. Конструкція поділяється на суперелементи
у такий спосіб, що поверхні вирізу включаються в граничні по-
верхні суперелементів. При генерації дискретної схеми об'єкту
поверхні вирізу апроксимуються системою граничних елементів і
враховуються відповідною системою граничних умов. Застосування
суперелементного підходу не обумовлює ніяких заперечень на
форму вирізу. Напружено-деформований стан в окіллі вирізу
вивчається згідно з концепцією квезікріхкого руйнування.
Проблеми з вирізами запропоновано вивчати на основі загальної
процедури методу граничних елементів. Результатом чисельного
аналізу є картина розподілу напружень і переміщень поблизу
вирізу, необхідних для обчислення коефіцієнту інтенсивності

напружень $K_I^{\text{расч}}$. Процедура обчислення КІН заснована на екстраполяційному підході. В даній роботі використано екстраполяцію до фронту вирізу з переміщень поверхні вирізу, а також із напружень перед фронтом вирізу. В умовах нормального відриву екстраполяційні співвідношення мають вигляд:

$$K_I^{\text{расч}} = \frac{\dot{G} \sqrt{\pi}}{(1-\nu)} \lim_{r \rightarrow 0} (V(r, \varphi = 180^\circ) / \sqrt{2r})$$

$$K_I^{\text{расч}} = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{yy}(r, \varphi = 0^\circ) \sqrt{2\pi r}) .$$

де $V(r, \varphi)$ - переміщення розкриття поверхні вирізу; $\sigma_{yy}(r, \varphi)$ - розподіл напружень розкриття перед фронтом вирізу. При екстраполяції до уваги беруться тільки прямолінійні ділянки графіків функцій $K_I^{\text{расч}}(r)$ для малих r . Екстраполяцію реалізовано з використанням методу найменших квадратів з лінійною апроксимацією функцій.

Методика знаходження КІН в двумірній постановці відпрацьовується під час аналізу задачі про безкінечну смугу з центральним вирізом в умовах дії зусиль розтягнення, з такими геометричними і фізико-механічними характеристиками: $2l/W=0.5$, $E=1$. Для моделювання безкінечності достатньо проаналізувати смугу довжиною $2l/W=3$. Виконуються два типи аналізу цієї задачі: в плоскому напруженому стані, при $\nu=0.3$, та в умовах плоскої деформації (просторова постановка), при $\nu=0$. Плоский аналіз виконується з використанням двумірних розривних граничних елементів другого, третього, четвертого і п'ятого степенів. Критерієм збіжності розв'язання обрана величина розкриття в центрі вирізу, як незалежна від величини КІН. Точність розв'язання суттєво залежить від схеми дискретизації в окілї вершини вирізу. При генерації сітки з достатнім ступенем згущення в Δ -окілї вершини вирізу погрішність обчислення не перевищує 1% для будь-якого типу використаних граничних елементів. На етапі визначення коефіцієнту $K_I^{\text{расч}}$ інтенсивності напружень, використано оптимальну сітку граничних елементів. При виконанні вимог до формування дискретної схеми висока точність обчислення коефіцієнта інтенсивності напружень ($\epsilon < 1.5\%$) і визначення компонент НДС ($\epsilon < 1.5\%$) забезпечувалася всіма використаними типами граничних елементів високого степеню. Доведено, що при

визначенні КІН за результатами чисельного аналізу припустимо користуватися як переміщеннями, так і напруженнями. Помилка обчислення в обох випадках не перевищувала 1.5%. Найбільша точність при обчисленні КІН була досягнута при екстраполяції по точкам з проміжку $0.03 \leq r/l \leq 0.09$.

З метою перевірки роботоздатності запропонованої методики визначення КІН в просторовому аналізі, задача про безкінечну смугу була досліджена в просторовій постановці. Товщина пластини задавалася рівною одиниці, $2H/W=3$. Граничні умови реалізували стан плоскої деформації. Фізико-механічні характеристики матеріалу: $E=1$, $\nu=0.3$. Границя апроксимувалася квадратичними розривними граничними елементами (9-вузлова схема). Точність розв'язання оцінювалася згідно з величиною розкриття в центрі плити. Формування дискретної схеми згідно з методикою, відпрацьованою при розв'язанні плоскої задачі, забезпечувало високу точність обчислення компонент НДС в окіллі фронту вирізу ($\epsilon < 1\%$). Розкриття в центрі вирізу для двумірної та просторової постановок обчислено з погрешністю, в порівнянні з еталонним значенням, відповідно рівною 0.17% і 0.7%. Нормалізовані КІН обчислювалися з переміщень та з напружень, отриманих як з двумірною, так і з просторового аналізу, при $\nu=0.3$. Розбіг між K_I^{2D} і K_I^{3D} у вивчених випадках складав 0.4%.

В даному розділі виконано також аналіз просторових ефектів напружено-деформованого стану в перехідному шарі, безпосередньо прилеглому до фронту вирізу. У зв'язку з цим розглянуто розтягіння короткого призматичного бруса з центральним вирізом зусиллями, діючими на його торцях. Геометричні параметри задачі: $2H/W=1$, $2l/W=0.5$, $t=1$, де l - напівширина вирізу, $2H$, W і t - його висота, ширина і товщина бруса. Фізико-механічні характеристики задачі: $E=1$, $\nu=0, 0.3, 0.5$. При розв'язанні задачі використовуються 9-вузлові квадратичні граничні елементи. За результатами розв'язання задачі визначаємо нормалізований коефіцієнт інтенсивності напружень, отриманий з переміщень та з напружень. Відносна погрешність обчислення КІН при $\nu=0$ становить, відповідно, 0.14% і 1%. Як і очікувалося, при $\nu=0$ отримано значення постійне вздовж фронту вирізу і є таким, що точно відповідає двомірному КІН. При $\nu=0.3, 0.5$ поведінка функції нормалізованого коефіцієнту інтенсивності напружень і функції

розкриття в центрі вирізу змінюється. Графіки зміни функцій $K_I^{расч}(z)/\sigma\sqrt{\pi l}$ по товщині бруса для різних значень ν наведено на малюнку 1,а. Графіки зміни величини розкриття в центрі вирізу по товщині бруса для різних ν показано на малюнку 1,б. Просторовий характер рішення виявляється найбільш яскраво із зростанням ν . Вплив вільної поверхні на напружено-деформований стан в перехідному шарі, де компоненти НДС демонструють нелінійний характер, вивчається при визначенні коефіцієнта стиснення α по товщині бруса: $\alpha = \sigma_{zz} / \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})$, при $\nu=0.3$ (малюнок 2).

Запропоновану методику було застосовано для розв'язання практичної задачі про двошаровий товстостінний циліндр з вирізами. Конструкція являла собою двошаровий циліндр в умовах дії високого тиску $p=3000$ атм. Внутрішню поверхню циліндру послаблено некрізними вирізами. Шари виконано з матеріалів, що мають високі показники міцності, та відрізняються один від одного фізико-механічними характеристиками. В процесі виготовлення та експлуатації таких конструкцій часто виникають дефекти типу розтріскування, які моделюються у вигляді періодичної системи напівеліптичних вирізів на внутрішній поверхні циліндру.

На малюнку 3 відображено двошарову трубу високого тиску і схему розміщення вирізів на її внутрішній поверхні. Фізико-механічні характеристики зовнішнього шару: $E_1=2100000 \text{ кг/см}^2$, $\nu_1=0.3$. Внутрішній шар циліндру виконано з матеріалу, близького за властивостями до кераміки: $E_2=460000 \text{ кг/см}^2$, $\nu_2=0.3$. Вплив ступеня розтріскування на напружено-деформований стан конструкції визначається при дослідженні задачі з 4, 6 й 12 симетрично розташованими вирізами в перерізі циліндру. Співвідношення глибини вирізу до товщини стінки циліндру приймалося: $b/H=0.125$; співвідношення головних напіввісей вирізу $b/a=0.5$. Поверхня вирізу знаходиться в умовах дії тиску величин p .

Розрахункова схема задачі (малюнок 4) формується, з урахуванням циклічної симетрії, у вигляді сегменту величин $\phi=15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$, в залежності від міри розтріскування. Постановка з 4 вирізами включала поділ на 6 суперелементів, постановка з 6 вирізами - 4 суперелементи, постановка з 12 вирізами - 2 суперелементи.

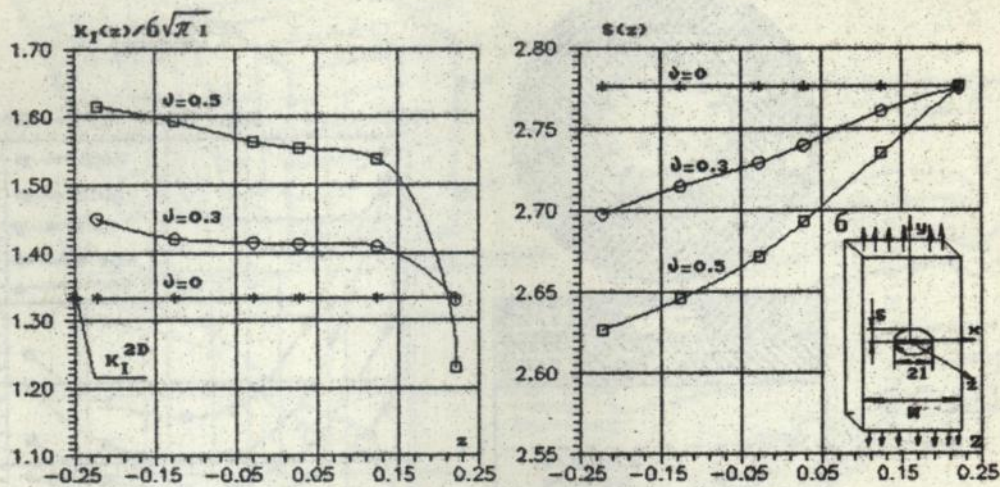


Рис. 1. Результаты напряженного анализа области выреза:
 а) изменение КИН вдоль фронта выреза для различных значений коэффициента Пуассона ν ;
 б) изменение величины раскрытия z центра по толщине вруса.

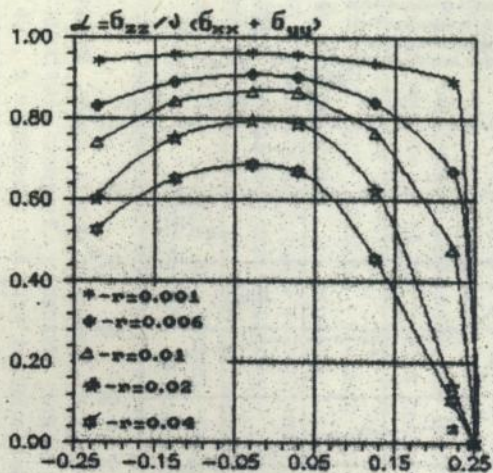


Рис. 2 .

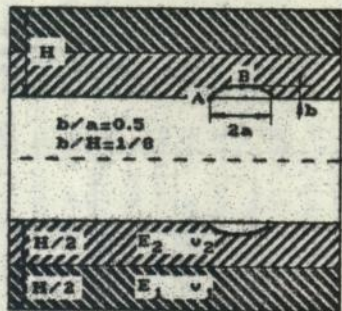


Рис. 3 .

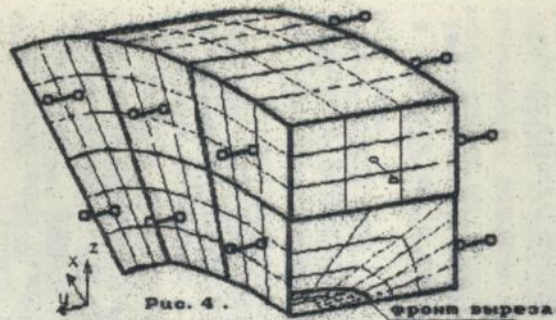


Рис. 4.

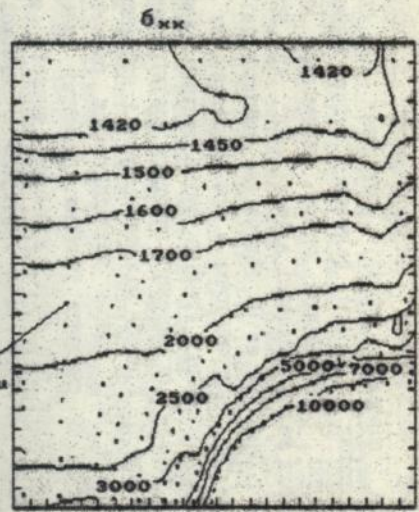


Рис. 6.

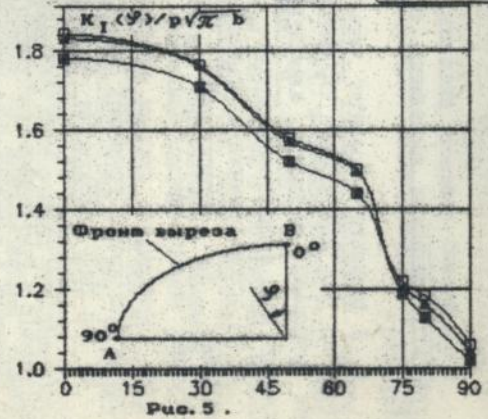


Рис. 5.

Величина коефіцієнту інтенсивності напружень у точках фронту вирізу визначалася екстраполяцією з нормальних переміщень V_x поверхні вирізу, обчислених на граничних елементах, належних до Δ -скілі. Величини КІН були отримані для семи характерних точок фронту вирізу, визначених кутом ϕ , відлічуваним від малої напіввісі еліпсу: $\phi=0^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 65^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 90^\circ$. Значення $\phi=0^\circ$ відповідає найглибокішій точці вирізу В, а $\phi=90^\circ$ визначає точку А при виході вирізу на внутрішню поверхню циліндру. Графіки зміни нормалізованих КІН вздовж фронту вирізу для вивчених випадків розтріскування показано на малюнку 5. Різниця між найбільшим і найменшим значеннями КІН для всіх типів розтріскування становить, в середньому, 43%. Як свідчать графіки, характер залежностей залишається постійним при зміні кількості вирізів, однак з підвищенням міри розтріскування внутрішньої поверхні труби відзначається падіння рівню КІН вздовж усього фронту вирізу, в середньому, на 4%. На малюнку 6 представлено розподіл нормальних напружень по площині вирізу.

В заключенні наведено висновки, сформульовані на основі результатів виконаних досліджень. Основні з них полягають в наступному:

1. В результаті розвитку чисельно-аналітичного методу потенціалу для просторових складених конструкцій розроблено типи розривних граничних елементів високого порядку, що поширюють межі застосування методу.

2. На основі створення аналітичних формул для обчислення регулярних та нерегулярних інтегральних коефіцієнтів дискретних аналогів формул Соміліана, з урахуванням довільного степеню апроксимації густини еластопотенціалів, удосконалено алгоритм розв'язання граничної задачі для складених об'єктів.

3. Для ряду характерних тестових задач виконано аналіз якості аналітичної процедури обчислення інтегральних коефіцієнтів з урахуванням довільного закону апроксимації функцій напружень і переміщень на границі області.

4. На основі розробленої методики визначення коефіцієнту інтенсивності напружень, виконано аналіз напружено-деформованого стану масивних об'єктів з вирізами.

5. При розв'язанні тестових задач вироблено рекомендації щодо вибору параметрів дискретної схеми об'єкту при

розв'язанні задач з вирізами.

6. Розроблену методику обчислення складених просторових конструкцій реалізовано в пакеті прикладних програм. Висока ступінь автоматизації і лаконічність опису вхідних даних забезпечили використання пакету в ряді організацій.

7. Обґрунтовано вигогідність застосування розробленої методики дослідження просторових складених об'єктів з урахуванням локальних ефектів шляхом проведення чисельних експериментів, виконаних з використанням різних типів граничних елементів, при послідовному підвищенні ступеню дискретизації границі об'єкту, а також шляхом порівняння результатів обчислення з аналітичними рішеннями та з результатами, отриманими іншими чисельними методами.

8. На основі аналізу напружено-деформованого стану двохшарової труби високого тиску, послабленої періодичною системою вирізів на внутрішній поверхні, визначено коефіцієнти інтенсивності напружень вздовж фронту вирізу для різної міри розтріскування внутрішньої поверхні труби.

Основний зміст дисертації відображений в таких публікаціях:

1. Алгоритм расчета составных объектов численно-аналитическим методом потенциала. - Деп. в ВИНТИ №1198-Ук91, 1991, 32с. (Співавтори - Вержський Ю.В., Сіньов П.О.)

2. Влияние аппроксимации плотностей в соотношениях метода потенциала для задач с разрезами// Тез. докл. Всесоюз. науч.-тех. конф. - Киев, 1991. - С.23. (Співавтори - Анкянець К.І., Сіньов П.О.)

3. Численное определение коэффициентов систем уравнений в методе потенциала для анизотропных сред. - Деп. в ВИНТИ №1197-Ук 91, 1991.- 29с. (Співавтор - Сіньов П.О.)

4. Методика решения граничных интегральных уравнений плоской задачи теории упругости с использованием сплайн-аппроксимации.- Деп. в УкрНИИТИ №1673-Ук89, 1989.- 24с.

Кандидирал- Синева В.А. Численно- аналитический метод потенциала для трехмерных составных объектов с вырезами.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.23.17.- строительная механика, Киевский международный университет гражданской авиации, Киев, 1995.

В диссертационной работе рассматривается методика применения ЧАМІ для расчета составных пространственных конструкций с вырезами. Построена последовательность разрывных граничных элементов произвольно высокого порядка. Предложена методика аналитического вычисления интегральных коэффициентов дискретных аналогов формул Соммиана по плоским граничным элементам с учетом произвольного закона аппроксимации функций напряжений и перемещений на границе; единый подход распространяется на процесс вычисления регулярных и нерегулярных интегралов. Разработаны требования к процессу генерации сетки граничных элементов в области выреза для достоверного определения КИН. Дан анализ напряженно- деформированного состояния массивных объектов с вырезами.

Ключові слова: складені об'єкти, розривні граничні елементи, чисельно- аналітичний метод потенціалу, аналітична процедура обчислення інтегральних коефіцієнтів, вирізи.

Candiral- Sineva V.A. Boundary integral equation method application for the three - dimensional coupled cracked constructions.

Thesis for the PhD degree in Structural Mechanics aspi ration, Kiev International University of Civil Aviation, Kiev, 1995.

Advanced application of boundary integral equation method considered for the numerical analysis of the three- dimensional coupled cracked constructions. The sequence of discontinuous boundary elements worked out. The method of analytical integration procedure proposed for obtaining of the integral coefficients using arbitrary degree approximation for stress and displacements. The same procedure used for both regular and singular integrals. Elastic analysis carried out for the number of cracked objects.

Key words: discontinuous boundary elements, boundary element method, analitical integration procedure, cracks.

Подписано в печать 06.02.95, формат 60x84/16. Бумага типографская.
Офсетная печать. Усл.кр.-отт. 4, Усл.печ.л.0,93. Уч.-изд.л.1,0.
Тираж 100 экз. Заказ № 32-1. Цена , Изд. № 217/Ш.

Издательство КМУТА,

252056, Киев-56, проспект Космонавта Комарова,1.

AB 31.993