

## АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОБОТИ ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ ХАРЧОВОЇ І ХІМІЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Досліджено особливості роботи центрифуг для харчової і хімічної промисловості. Проведено числовий розрахунок центрифуги загального використання і дано рекомендації щодо змінення геометричних параметрів конструкції.

**Ключові слова:** рідина, емульсія, сепаратор, математична модель, апробація, максимальне напруження, дослідження, хімічна промисловість.

У харчовій та хімічній промисловості досить часто доводиться використовувати процеси розділення неоднорідних сумішей на основі рідин. Це можуть бути як суміші рідини з твердими частками (суспензія), так і суміші двох рідин, що не змішуються між собою (емульсії). Для розділення емульсій на складові частини зазвичай використовують центрифуги і сепаратори, в яких процес осадження (або випливання) зважених крапель рідини відбувається під дією відцентрових зусиль [4, 6].

Центрифуги належать до масивних апаратів хімічної і харчової промисловості, на виготовлення яких витрачається досить багато металу. Тому актуальним є якнайточніше визначення геометричних параметрів центрифуги на стадії проектування, що може сприяти значному зниженню маси і вартості апарату.

У наш час конструкції на міцність розраховують числовими методами, серед яких провідне місце займає метод скінченних елементів (МСЕ). В цій роботі розглянуто використання МСЕ при проектному розрахунку центрифуг загального використання.

Розробляючи математичну модель для розрахунку центрифуги, велику увагу приділяли особливостям роботи центрифуги, а саме правильному визначенню зусиль, що діють на неї. Центрифуга може мати складну несиметричну конструкцію. Таку конструкцію не можна розраховувати в осесиметричній постановці. Тому неабияке значення треба приділити скороченню часу на розрахунок конструкції. Тобто насамперед постає завдання оптимального вибору ефективного скінченного елемента (СЕ), який би, з одного боку, з достатньою точністю описував конструкцію з криволінійною геометрією контуру та різкою зміною форми поверхні, а з другого — давав можливість використову-

*Peculiarities of centrifuge operation for food and chemical industries are studied. Numerical calculations of general use centrifuge are made. Recommendations to change geometries of a construction are given.*

**Key word:** liquid, emulsion, separator, mathematic model, approbation, maximum tension, research, chemical industry.

вати для цього відносно невелику кількість скінченних елементів. Виходячи з вищесказаного найоптимальнішим став вибір шестигранного криволінійного СЕ з полілінійною апроксимацією переміщень [2]. При цьому дискретизація розрахункових співвідношень відбувається в рамках моментної схеми методу скінченних елементів МСМСЕ [3]. Спосіб зображення деформацій за цією схемою зведений до суворої відповідності з порядком апроксимації функцій переміщень з таким розрахунком, щоб виключити всі компоненти деформацій, які реагують на жорсткі зміщення, і зберегти геометричну незмінність системи. Досвід використання МСМСЕ у розрахунках великої кількості криволінійних конструкцій, особливо чутливих до врахування жорстких зміщень, повністю підтвердив її високі показники відносно швидкості збіжності й економічності.

Загальний вигляд шестигранного криволінійного скінченного елемента з лінійною апроксимацією переміщень наведено на рис. 1.

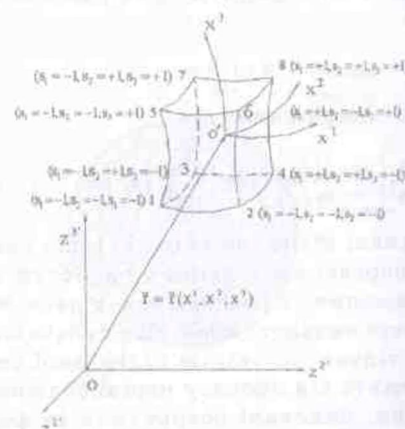


Рис. 1. Вигляд шестигранного криволінійного скінченного елемента

Коефіцієнти матриці жорсткості для цього типу СЕ визначаються співвідношенням

$$K_{ij}^{(n)} = C_{ij}^{(n)} \cdot r_{ij}^{(n)} \cdot \left\{ \mu g^{(n)} \cdot g^{(n)} \cdot \frac{\prod_{k=1}^3 [(1 - \delta_{(n)}^{(k)}) s_{(n)}^{(k)} r_{ij}^{(k)} (1 - \delta_{(n)}^{(k)} + 3)]}{[(1 - \delta_{(n)}^{(1)}) (1 - \delta_{(n)}^{(2)}) s_{(n)}^{(1)} r_{ij}^{(1)} + 3]} \right. \\ \left. \times \left[ \frac{1 - \delta_{(n)}^{(3)}}{48 [(1 - \delta_{(n)}^{(3)}) (1 - \delta_{(n)}^{(3)}) s_{(n)}^{(3)} r_{ij}^{(3)} + 3]} + \frac{\delta_{(n)}^{(3)}}{144} \right] - \frac{1}{16} \lambda g^{(n)} \cdot g^{(n)} \right\} \sqrt{g}, \quad (1)$$

де  $K_{ij}^{(n)} = [F]^{(n)}$  — матриця жорсткості СЕ розмірністю  $24 \times 24$ ;

$$f = 1 + \frac{2}{3} (r_1 + 1) + 3(r_2 + 1) + 6(r_3 + 1); \quad (2)$$

$$\psi = f - \frac{3}{2} (s_1 - 1) - 3(s_2 - 1) - 6(s_3 - 1), \quad (3)$$

$r_i$  — величини, що показують (аналогічно  $S_i$ ) розміщення вузлових точок місцевої системи координат (рис.1):

$$r_i = \begin{cases} +1 & \text{при } \bar{x}^i > 0, \\ -1 & \text{при } \bar{x}^i < 0. \end{cases} \quad (4)$$

Розробляючи математичну модель центрифуги, сили інерції визначали за класичними формулами теоретичної механіки [1, 5]:

$$F_i = m g \omega^2, \quad (5)$$

де  $m$  — маса матеріальної точки;  $r$  — відстань від точки до осі обертання;  $\omega$  — кутова швидкість обертання.

Виконуючи нескладні перетворення відносно скінченного елемента, дістали

$$F_i = \frac{\gamma}{g} V r \left( \frac{\pi n}{30} \right)^2, \quad (6)$$

де  $V$  — об'єм скінченного елемента;  $\gamma/g$  — питома вага матеріалу.

При визначенні відцентрових сил, що діють на центрифугу внаслідок обертального руху рідини, також застосовували загальновідомі формули теоретичної механіки. Так, максимальний рівень рідини в центрифугі визначали за залежністю

$$h_{\max} = h + \frac{\omega^2 R^2}{4g}, \quad (7)$$

де  $h$  — рівень рідини в нерухомому апараті (рис.2).

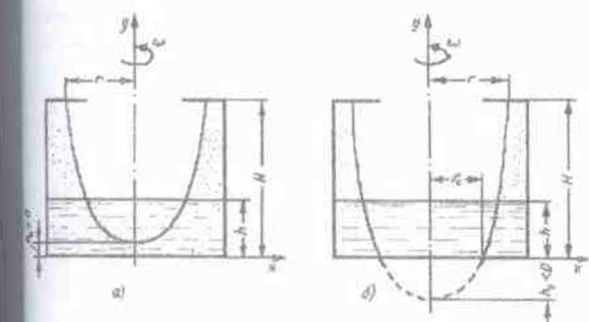


Рис. 2. Розподіл рідини в центрифугі

Відстані від осі обертання до шару рідини біля стінки для випадку, коли днище центрифуги покрите рідиною (рис.2, а):

$$r = \sqrt{\frac{4g(H-h)R^2}{\omega^2}}; \quad (8)$$

коли днище не покрите рідиною (рис.2, б):

$$r = \sqrt{\frac{R^2(H-h)}{H} + \frac{gH}{\omega^2}}; \quad r_s = \sqrt{\frac{R^2(H-h)}{H} - \frac{gH}{\omega^2}} \quad (9)$$

Розроблену методику навантаження апробували, розв'язуючи контрольну тестову задачу для диска, що швидко обертається навколо власної осі. Порівнювальний аналіз результатів аналітичного і числового розв'язання (рис.3) свідчить про достатню збіжність результатів (у межах 1,7 %) та про можливість застосування розробленої методики навантаження для розв'язання задач цього класу.

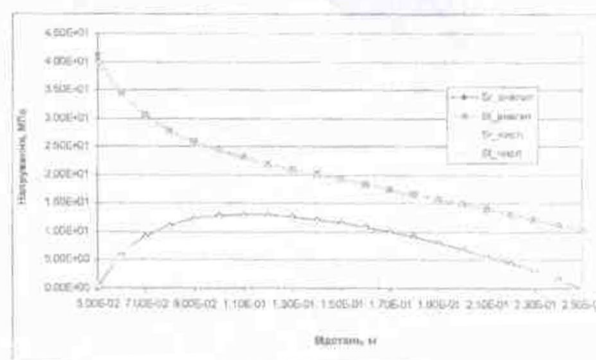


Рис. 3. Порівняльна діаграма радіальних ( $S_r$ ) і тангенціальних ( $S_t$ ) напружень для аналітичного й числового розв'язання

Для проведення необхідних числових розрахунків була розроблена скінченно-елементна модель центрифуги, що показана на рис. 4.



Рис. 4. Скінченно-елементна модель центрифуги

Після прикладення навантажень згідно з методикою, що описана вище, та проведення розрахунку отримали загальну картину напружено-деформованого стану центрифуги, що виникає в ній внаслідок комплексної дії відцентрових сил від обертання безпосередньо конструкції та рідини. Деформовану модель центрифуги показано на рис. 5.

Максимальні розтягувальні напруження, що виникають в конструкції від дії такого навантаження, зображено на рис. 6.



Рис. 5. Деформована модель центрифуги

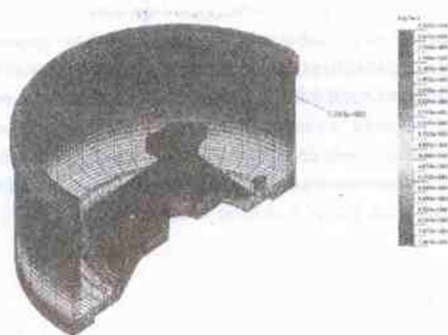


Рис. 6. Максимальні розтягувальні напруження в конструкції від дії відцентрових сил корпусу та рідини

Щоб підтвердити коректність отриманих результатів, провели додаткові розрахунки при різних схемах навантаження конструкції. В першому випадку як навантаження використовували відцентрові зусилля, що виникли внаслідок обертання безпосередньо центрифуги. В другому випадку до конструкції прикладали навантаження, що виникають в рідині під час обертання центрифуги навколо її осі. Результати розрахунків зображено відповідно на рис. 7 і 8, з яких видно, що сумарні результати обчислень центрифуги від дії кожного навантаження окремо повністю збігаються з результатами розрахунку від дії комплексного навантаження.

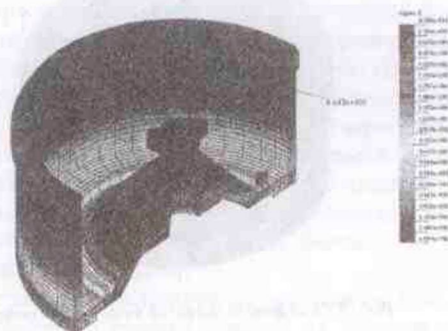


Рис. 7. Максимальні розтягувальні напруження в конструкції від дії відцентрових сил у корпусі

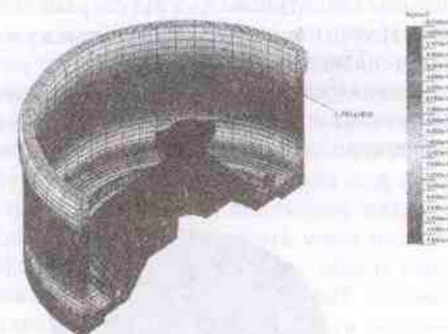


Рис. 8. Максимальні розтягувальні напруження в конструкції від дії відцентрових сил у рідині

**Висновки.** Проведено дослідження особливостей роботи центрифуги загального використання. Аналіз результатів розрахунків центрифуги показує, що максимальні напруги, які виникають у ній внаслідок обертання її навколо власної осі, значно нижчі за гранично допустимі. Тому ми рекомендували змінити геометричні параметри конструкції, а саме зменшити товщину стінки циліндричної частини. Це дасть суттєве зменшення маси конструкції, а також її вартості.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Канторович З.Б. Машины химической промышленности. — М.: Машиностроение, 1964. — 415 с.
2. Сахаров А.С. Моментная схема конечных элементов (МСКЭ) с учетом жестких смещений // Сопроствление материалов и теория сооружений. — 1974. — Вып. 24. — 147 с.
3. Метод конечных элементов в механике твердых тел./А.С. Сахаров, В.Н. Кислюк, В.В.Киричевский и др. — К.: Вища шк., 1982. — 479 с.
4. Поникаров И.И. Машины и аппараты химических производств. — М.: Машиностроение, 1989. — 368 с.
5. Соколов В.И. Основы расчета и конструирования машин и аппаратов пищевых производств. — М.: Машиностроение, 1983. — 447 с.
6. Соколов В.И. Центрифугирование. — М.: Химия, 1976. — 407 с.

Надійшла до редколегії 16. 04. 05 р.