METHODOLOGY OF CONSTRUCTION CALCULATION OF BIOREACTORS WITH A JOINT ACTION OF DIFFERENT LOADS

A. Kopylenko

National University of Food Technologies

V. Shybetsky, S. Kostyk, V. Povodzinskiy

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Key words:

Permissible stress

Yield strength

Strength limit

Load

Strength

Stiffness

Structural calculation

Article history:

Received 12.01.2018

Received in revised form

26.01.2018

Accepted 07.02.2018

Corresponding author:

A. Kopylenko

E-mail:

npnuht@ukr.net

ABSTRACT

In the article the methodology of automated constructive calculation of capacitive device, which is under the joint action of several types of loads, is proposed. A static analysis of the effect of pressure, axial force, bending moment and distributed transverse force was carried out. For modeling device with given overall dimensions and features of structural elements, taking into account the physical properties of the material from which it was made and the parameters of the technological process, a computer calculation was made in the SolidWorks. The purpose of the calculation was to determine the optimal geometric parameters of the device, the selection of material, the need to strengthen it due to increase rigidity of the design. The efficiency of using various technical solutions for increasing durability and stiffness of the structure is analyzed.

The following technical solutions were proposed to increase the strength and stability of the capacitive equipment: firstly, the classical approach, implemented during the installation of transverse rigid rings; and secondly, the use of a toroidal and flat transition to weld a shirt; and thirdly, the use of longitudinal stiffness ribs. In addition, the impact on the strength and stability of the elements of equipment, with the attachment of an elliptical bottom and a cover, is analyzed. The configuration and the number of additional hardness elements are selected by optimizing design in the SolidWorks medium. All these solutions have yielded positive results with different efficiency, but the use of a specific solution should be selected, based on the specific situation and features of the technological process. Recommendations on the use of specific technical implementations were given. The materials of the presented research can be used as a guide in the practical activity of design engineers and in the educational process when designing capacitive equipment of different sizes and productivity.

DOI: 10.24263/2225-2924-2018-24-1-17

МЕТОДОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНОГО РОЗРАХУНКУ ФЕРМЕНТЕРІВ ПІД СПІЛЬНОЮ ДІЄЮ ДЕКІЛЬКОХ ВИДІВ НАВАНТАЖЕНЬ

А.В. Копиленко

Національний університет харчових технологій

В.Ю. Шибецький, С.І. Костик, В.М. Поводзинський

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

У статті запропоновано методологію автоматизованого конструктивного розрахунку ємнісного апарата, який знаходиться під спільною дією декількох видів навантажень. Проведено статичний аналіз дії тиску, осьової сили, згинального моменту та розподіленої поперечної сили. Для модельної ємності із заданими габаритними розмірами й особливостями елементів конструкції, враховуючи фізичні властивості матеріалу, з якого вона виготовлена та параметри технологічного процесу, було проведено комп'ютерний розрахунок у середовищі SolidWorks. Метою розрахунку було визначення оптимальних геометричних параметрів ємності, підбір матеріалу, необхідність її зміцнення за рахунок підвищення жорсткості конструкції. Проаналізовано ефективність використання різних технічних рішень для підвищення міцності та жорсткості конструкції.

Для підвищення міцності і стійкості ємнісного обладнання запропоновано використання таких технічних рішень: по-перше, класичний підхід, реалізований у встановленні поперечних кілець жорсткості; по-друге, використання торіодального і плоского переходу для зварювання із сорочкою; по-третє, використання повздовжніх ребер жорсткості. Крім того, аналізувався вплив на міцність і стійкість елемента обладнання при прикріпленні до нього еліптичного днища та кришки з відбортковою шляхом зварювання. Конфігурація та кількість додаткових елементів жорсткості підбиралися шляхом оптимізації конструкції в середовищі SolidWorks. Усі ці рішення давали позитивні результати з різною ефективністю, однак необхідне рішення повинно вибиратись з урахуванням конкретної ситуації, особливостей і специфіки технологічного процесу. Надано рекомендації щодо використання конкретних технічних реалізацій. Матеріали представленого дослідження можуть бути використані як посібник у практичній діяльності інженерів конструкторів і в навчальному процесі, при проектуванні ємнісного обладнання різних типорозмірів і продуктивності.

Ключові слова: допустиме напруження, границя текучості, границя міцності, навантаження, міцність, жорсткість, конструкційний розрахунок.

Постановка проблеми. Обладнання фармацевтичних і біотехнологічних виробництв представлене широкою номенклатурою, однак усі конструкції складаються із стандартних технічних рішень. Серед таких елементів обладнання варто відмітити опуклі днища, кришки, обичайки, штуцери, фланці,

опори тощо. У загальному випадку елементи конструкції апаратів працюють під спільною дією внутрішнього надлишкового або зовнішнього тиску, осьового стискаючого зусилля, згинаючого моменту та поперечного зусилля (наприклад, колонні апарати) [1; 2]. У цьому випадку товщина стінки обичайки попередньо визначається за умов міцності або стійкості від дії відповідного тиску, після чого проводять перевірку стійкості обичайок, які працюють під спільною дією декількох видів навантажень, для робочих умов та, у разі необхідності, умов випробувань за формулою [1—4]:

$$\frac{P}{[P]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} + \left(\frac{Q}{[Q]} \right)^2 \leq 1,$$

де P , F , M , Q — значення діючих на обичайку тиску (внутрішнього або зовнішнього, МПа), осьової сили (розтягуючої або стискаючої, МН), згинаючого моменту (МН·м) та розподіленої поперечної сили (МН/м), відповідно; $[P]$, $[F]$, $[M]$, $[Q]$ — допустимі значення тиску (внутрішнього або зовнішнього, МПа), осьової сили (розтягуючої або стискаючої, МН), згинаючого моменту (МН·м) та поперечної сили (МН/м) відповідно.

За відсутності дії на елемент обладнання якогось із навантажень відповідний доданок не включається до умови міцності при дії декількох видів навантажень.

Однак стандартний розрахунок, який проводиться, має ряд недоліків:

- тривалий час проведення розрахунків;
- складність розрахунків при спільній дії навантажень як у крайовій зоні, так і по всьому периметру;
- можливість проведення розрахунків виключно для одного перетину;
- складність візуалізації отриманих результатів [5—7].

Нами запропоновано методологію розрахунку таких елементів обладнання з використанням сучасного комп'ютерного пакета SolidWorks, що дає змогу проводити конструктивний розрахунок елементів ємнісного апарата з урахуванням особливостей проведення процесу [8].

Також слід зазначити, що класичним шляхом, який застосовується при проектуванні ємнісного обладнання у випадку невиконання умови міцності чи стійкості, є збільшення товщини стінки до наступного у ряді стандартного листового прокату або заміна матеріалу на матеріал з більш високими механічними параметрами міцності. Однак на сьогодні собівартість обладнання безпосередньо залежить від вартості матеріалів, тому більш раціональним, на наш погляд, є встановлення додаткових конструкцій (кілець і ребер) для підвищення загальної жорсткості і міцності конструкції [1—2].

Мета статті: розробка методології проведення автоматизованого розрахунку елементів конструкції ємнісного обладнання за умови спільної дії декількох видів навантажень.

Викладення основних результатів дослідження. *Перевірка на міцність і стійкість внутрішньої циліндричної обичайки.* Для проведення моделювання було створено розрахункову модель у середовищі SolidWorks та обрані нижченаведені орієнтовні початкові дані. Внутрішній діаметр оболонки — 1400 мм, висота циліндричної частини — 1500 мм, виконавча товщина —

4 мм, фізико-хімічні властивості матеріалу корпусу вибиралися для нержавіючої сталі AISI 321 з урахуванням температурного режиму в 140°C , який відповідає технологічній стадії стерилізації. Були проведені дослідження циліндричної обичайки (корпусу), яка знаходиться під спільною дією зовнішнього тиску й осової сили. Випробування проводилися для зовнішнього тиску 0,4 МПа й осової сили 2кН.

Рис. 1. Напружений і деформований стан обичайки

Результати розрахунків і дослідження показали перевищення меж текучості на 112 МПа в крайовій зоні обичайки, що, у свою чергу, викликає втрату стійкості і пластичні деформації (рис. 1).

Рис. 2. Напружений і деформований стан обичайки, укріпленої кільцями жорсткості

Для підвищення спроможності конструкції сприймати задані навантаження було прийнято рішення встановити два кільця жорсткості (рис. 2). Це дало змогу знизити крайові напруження до 86,1 МПа, що набагато нижче за межу текучості 234,4 МПа. Крім того, виникла необхідність перевірити вплив елементів конструкції на міцність. Тобто розглянуто обичайку (без кілець жорсткості) в комплексі з привареними до неї встик днищем і кришкою (рис. 3).

Рис. 3. Напружений і деформований стан обичайки з привареним до неї днищем і кришкою

У результаті було встановлено, що корпус апарата в комплексі компенсує напруження, які виникають у крайовій зоні обичайки (нижче за границю текучості) і зберігають конструкцію стійкою до пружинних деформацій.

Отже, з огляду на напружений стану конструкційні особливості і технологічні параметри запропонована конструкція проходить за всіма розрахунками на міцність і стійкість є працездатною, надійною і безпечною.

Розрахунок на міцність циліндричної сорочки.

Нами були проведені дослідження циліндричної сорочки, яка знаходиться під спільною дією внутрішнього надлишкового тиску й осьової сили. Випробування проводилися для внутрішнього тиску 0,4 МПа і осьової сили 2кН. Фізико-хімічні властивості вибиралися для нержавіючої сталі AISI 321 з урахуванням температурного режиму в 140° С, товщини стінки 2 мм і внутрішнього діаметра 1600 мм. Розрахунки проводилися для плоского (кільцевого) і тороїдального переходу.

Рис. 4. Напружений і деформований стан сорочки з плоским (кільцевим) переходом

Результати розрахунків і дослідження показали перевищення границі текучості на 315 МПа в крайовій зоні обичайки, що, у свою чергу, спричиняє втрату стійкості і призводить до виникнення пластичних деформацій.

Рис. 5. Напружений і деформований стан сорочки з тороїдальним переходом

Результати моделювання показали перевищення границі текучості на 244 МПа в крайовій зоні обичайки, що, у свою чергу, викликає втрату стійкості і відповідає пластичним деформаціям (рис. 5). Однак слід зазначити, що тороїдальний перехід знизив напруження в крайовій зоні на 80 МПа, порівнюючи з плоским (кільцевим) переходом.

Оскільки вибір матеріалу з кращими механічними властивостями безпосередньо пов'язаний із збільшенням його вартості, тому що збільшення товщини стінки призводить до збільшення вартості одиниці продукції, було прийнято рішення спробувати підвищити міцність конструкції за рахунок встановлення кілець і ребер жорсткості.

Рис. 6. Напружений і деформований стан сорочки, укріпленої кільцями жорсткості

Результати моделювання показали перевищення границі текучості на 171 МПа в крайовій зоні обичайки, що, у свою чергу, викликає втрату стій-

кості і пластичні деформації (рис. 6). Перевірялися різні профілі кілець жорсткості, позитивних результатів аналіз не дав.

Було запропоновано встановити три кільця жорсткості. Такий варіант дав змогу незначно знизити максимальні напруження в стінці сорочки, проте позитивного результату не було досягнуто (рис. 7). Перевищено границю текучості на 115 МПа.

Рис. 7. Напружений і деформований стан сорочки, укріпленої трьома кільцями жорсткості

Слід зазначити, що установка чотирьох кілець також не дала результатів, а установка п'яти є нерациональною для таких габаритних розмірів сорочки.

Також було проаналізовано можливість зміцнення поздовжніми (осьовими) ребрами жорсткості циліндричної обичайки.

Слід зазначити, що чотири поздовжніх ребра не дали позитивних результатів. Був проведений аналіз для шести ребер (рис. 8).

Рис. 8. Напружений і деформований стан сорочки, укріпленої шістьма ребрами жорсткості

Результати розрахунків і моделювання показали досить непогані результати. Це дало змогу наблизитися до зовсім незначного перевищення межі

текучості на 4 МПа в крайовій зоні сорочки. Було прийнято рішення розглянути конструкцію в комплексі суцільнозварного апарата.

Рис. 9. Напружений і деформований стан сорочки, укріпленої шістьма ребрами жорсткості в комплексі з тороїдальним переходом

Результат: конструкція (рис. 9) витримує задані навантаження в межах границі текучості. Однак запас міцності незначний і складає близько 5%. За всіма відомими нормативами він повинен перевищувати 10%. Установка восьми поздовжніх ребер ситуацію суттєво не покращила, і тому такий варіант не є раціональним з точки зору проведення великого обсягу зварювальних робіт.

Установка внутрішніх ребер також не дала позитивних результатів за межею текучості (рис. 10).

Рис. 10. Напружений і деформований стан сорочки, укріпленої шістьма внутрішніми ребрами жорсткості в комплексі з плоским переходом

Окремим пунктом розглядалася можливість створення так званої секційної сорочки, що, у свою чергу, одночасно працює як теплообмінний пристрій і як ребро жорсткості, проте результати показали перевищення межі текучості практично в 2 рази, що є несприятливим фактором (рис. 11).

Рис. 11. Напружений і деформований стан секційної сорочки з плоским переходом

З цієї причини ми вирішили перевірити статичні навантаження для листа товщиною в 3 мм.

Рис. 12. Напружений і деформований стан циліндричної сорочки з плоским переходом

Результати розрахунків і моделювання показали запас міцності циліндричної сорочки на 25% з плоским переходом без установки кілець жорсткості.

Результати моделювання:

1. Циліндрична обичайка корпусу (яка знаходиться під сорочкою) з товщиною 4 мм працездатна, безпечна і відповідає всім вимогам, які ставляться до елементів ємнісного обладнання.

2. Сорочка з товщиною стінки 2 мм не відповідає за параметрами міцності і стійкості (необхідно вдосконалити конструкцію).

3. Серед багатьох конструктивних рішень був запропонований варіант з шістьма поздовжніми ребрами і способом кріплення сорочки до циліндричної обичайки через тороїдальний перехід. Така конструкція працездатна, однак вона не відповідає чинним нормам безпеки (запас міцності менше 5%), тоді як за всіма нормативами запас міцності повинен бути понад 10%. (Можна використовувати дане рішення, але ми не рекомендуємо). Установка шести

ребер жорсткості і двох тороїдальних переходів досить трудомісткий процес, який пов'язаний передусім з великою кількістю додаткових технологічних операцій з виготовлення ребер і тороїдального переходу, площа зварювальних робіт досить значна, що потребує значних капітальних витрат.

4. Ми рекомендуємо виконати сорочку з товщиною стінки 3 мм, без установки тороїдального переходу і ребер жорсткості. Така конструкція забезпечує запас міцності понад 25% і безпечну надійну роботу, відповідає всім сучасним нормативним документам.

Висновки

Запропоновано методологію проведення автоматизованого розрахунку елементів конструкції ємнісного обладнання за умови спільної дії декількох видів навантажень з використанням системи автоматизованого проектування SolidWorks. Методологія розрахунку і моделювання може бути використана при проектуванні ємнісного обладнання інших типорозмірів і продуктивності.

Література

1. *Лашинский А.А.* Конструирование сварных химических аппаратов. [Текст] / А.А. Лашинский. — Ленинград : «Машиностроение», 1981. — 382 с.
2. *Лашинский А.А.* Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. [Текст] / А.А. Лашинский, А.Р. Толчинский. — Ленинград : «Машиностроение», 1970. — 752 с.
3. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев, — Ленинград : «Машиностроение», 1970. — Т. 1. — 752 с.
4. *Анурьев В.И.* Справочник конструктора-машиностроителя [Текст] / В.И. Анурьев, — Ленинград : «Машиностроение», 1970. — Т. 2. — 560 с.
5. *Костик С.І.* Розрахунок і конструювання типового устаткування — 1. Тонкостінні посудини та апарати [Електронний ресурс] : методичні вказівки до самостійної роботи студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» спеціальності 7(8).05050314 «Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв», форми навчання денна / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С.І. Костик, О.А. Асафтей. — Електронні текстові дані (1 файл: 339,54 Кбайт). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. — 28 с.
6. *Костик С.І.* Розрахунок і конструювання типового устаткування — 2. Опори, стропові пристрої та теплообмінне обладнання [Електронний ресурс] : методичні вказівки до самостійної роботи студентів напряму 6.050503 «Машинобудування» спеціальності 7(8).05050314 «Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв», форми навчання денна [Електронний ресурс] / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад. С. І. Костик, О.А. Асафтей, В.П. Косова. — Електронні текстові дані (1 файл: 385,51 Кбайт). — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. — 43 с.
7. *Мотроненко В.В.* Розрахунок та конструювання спеціального обладнання [Електронний ресурс] : методичні вказівки до виконання домашньої контрольної роботи з кредитного модуля «Розрахунок і конструювання спеціального обладнання — 2. Розрахунок і конструювання перемішуючих пристроїв» для студентів напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування» спеціальності, 8.05050314 «Обладнання фармацевтичних та біотехнологічних виробництв» / НТУУ «КПІ» ; уклад. В. В. Мотроненко, С. І. Костик. — Електронні текстові дані (1 файл: 2,27 Мбайт). — Київ : НТУУ «КПІ», 2015. — 63 с.
8. *Шибецький В.Ю.* Розробка конструкції та моделювання гідродинаміки в біореакторі з поверхневим культивуванням клітинних культур / В.Ю. Шибецький, С.М. Семенюк, С.І. Костик // Scientific Journal «ScienceRise». — 2017. — № 7(36). — С. 53—59.