

Гондляр О. В.,
Нікітін Р. Є.,
Онопрієнко В. Ю.

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТРІЩИН В БІМЕТАЛЕВИХ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЯХ

В роботі, на базі комплексу АПРОКС, шляхом інтегрування рівнянь руху за часом, в залежності від параметрів тріщиноутворення, виконується чисельне моделювання процесу розповсюдження тріщини в багатошарових оболонкових конструкціях. Розрахунки, на прикладі колони ректифікації проводились при номінальному та випробувальному режимах навантаження. На основі отриманих результатів було виявлено нелінійні залежності параметрів розповсюдження тріщин.

Ключові слова: АПРОКС, тріщина, чисельне моделювання, багатошарові оболонкові конструкції, колона ректифікації.

1. Вступ

Експлуатація апаратів та машин в хімічній промисловості свідчить про те, що за час роботи в них накопичуються локальні дефекти, які можуть призвести до руйнування конструкцій. В наслідок руйнування колон ректифікації аварія може не тільки привести до екологічної катастрофи, а також до людських жертв.

Актуальним питанням є здійснення моніторингу за життєвим циклом апаратів, які експлуатуються на протязі багатьох років і пройшли не один цикл ремонтних робіт, вичерпали розрахунковий термін експлуатації.

Інформаційна підтримка життєвого циклу об'єкта — процес реального часу, що потребує сучасних потужностей ЕОМ, які будуть проводити моніторинг стану об'єкта і при виявленні можливості руйнування сповістять оператора, що дасть можливість попередити катастрофу. Обраний напрямок дослідження дозволяє виявляти на ранніх стадіях зони накопичення дефектів, які потребують доробки або ремонту. Розробка системи підтримки життєвого циклу дасть можливість моделювання аварійних ситуацій, які можуть виникнути під час експлуатації. Результати роботи можуть бути використані при проектуванні нових конструкцій хімічного машинобудування.

2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Об'єкти хімічної промисловості відносяться до категорії небезпечних об'єктів [1–4]. Багато апаратів відслужили свій термін роботи і повинні підлягати ремонтним роботам, що включають в себе переварювання великих ділянок апаратів з заміною елементів. Їх подальша придатність повинна бути підтверджена результатами експертизи промислової безпеки. Практика експлуатації зварних біметалевих апаратів показала, що при порушенні технології зварювання можливе виникнення дефектів, які можуть спричинити руйнування всієї конструкції [5].

В хімічній промисловості маються випадки руйнування біметалевих апаратів після ремонтного обслуговування при навантаженнях значно нижчих від запланованих [6].

Руйнування виникали в місцях зварювання біметалевих листів, що зумовлено появою локальних залишкових напружень. Вони сприяють утворенню мікротріщин, котрі згодом в процесі експлуатації апаратів переростають в магістральні.

Метою роботи є розробка системи інформаційної підтримки життєвого циклу ректифікаційних колон з урахуванням процесів накопичення в них дефектів та можливістю моделювання розповсюдження магістральних тріщин в корпусах колон. Дана система розроблена на основі програмного комплексу АПРОКС, в основу якого покладено метод скінчених елементів (МСЕ) [7].

Як правило, в промисловості для біметалів застосовуються матеріали зі складу: вуглецевих сталей (СтЗсп, сталь 20К), низьколегованих сталей (16ГС, 09Г2С), конструкційних сталей (12МХ, 12ХМ) з шаром плакування корозійностійких сталей (08Х13, 12Х18Н10Т). Із всієї кількості біметалів 80 % доводиться на долю сталі 08Х13.

В роботі [8] описано руйнування корпусу ректифікаційної колони діаметром 3200 мм і товщиною стінки 28 мм (в зоні руйнування). Корпус ректифікаційної колони виконано з біметалевої сталі: 16ГС сталь 08Х13 (25 мм + 3 мм). Колона експлуатувалась більше ніж 15 років під внутрішнім тиском 0,9 МПа та при температурі 420 °С. Фізичні властивості матеріалу, з якого виготовлена колона: для сталі 16ГС модуль пружності $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, границя текучості для залишкової деформації. $\sigma_T = 300$ МПа; 08Х13 — $E = 2,17 \cdot 10^5$ МПа, $\sigma_T = 280$ МПа, коефіцієнт Пуассона — 0,3 для обох матеріалів.

Корпус ректифікаційної колони, який підлягає розрахунку на міцність, являє собою складну просторову конструкцію, що має криволінійні обриси. Якщо описання поверхні такої конструкції робити за допомогою класичних скінчених елементів, то для достатньо точної апроксимації її геометрії та напружено-деформованого стану потрібна дуже велика кількість елементів. Найбільш доцільно для опису подібної геометрії використовувати елементи криволінійного обрису, де коефіцієнти матриці жорсткості визначаються на основі співвідношень моментної схеми МСЕ. Це дозволяє при заданні границь тіла обійтися меншою кількістю елементів, тобто зменшити кількість невідомих при розв'язанні

системи рівнянь, а в результаті — час вирішення задачі. Співвідношення для такого типу СЕ зручно виводити в криволінійній системі координат.

При розрахунку конкретних конструкцій методом скінчених елементів дуже важливими є питання, пов'язані з вибором форми скінчених елементів, задоволенням умов сумісності деформацій при зміщеннях тіла як жорсткого цілого. До того ж, зневаження останньою обставиною призводить до появи в тілі «фіктивних» деформацій [9], наявність яких істотним чином відбивається на погіршенні збіжності чисельних розв'язань.

Особливо актуальним це питання ставиться при розрахунках складних просторових систем, окремі ділянки яких можуть зазнавати значних зміщень та жорстких поворотів. По мірі згущування сітки такі похибки загасають відносно повільно і для отримання вірогідних результатів вимагається невиправдано дрібне розбиття конструкції на СЕ. Це значною мірою знижує ефективність метода. Вивчення природи зниження точності результатів показало, що поява в тілі «фіктивних» деформацій обумовлена тим, що не всі види деформацій, що враховуються в співвідношеннях МСЕ, можуть бути вірно описані прийнятими законами апроксимації переміщень. Усунення «фіктивних» деформацій при жорстких зміщеннях елементарних об'ємів досягається, якщо в основу методики отримання матриці жорсткості включити передумови моментної схеми СЕ (МССЕ) основні співвідношення якої були отримані професором Сахаровим О. С. [10].

В МССЕ, на відміну від звичайного варіанта МСЕ, для будь-якого СЕ і довільних законів апроксимуючих функцій завжди виконується умова рівності нулю деформацій при зміщеннях тіла як жорсткого цілого. Це досягається тим, що в МССЕ деформації уявляються приблизно у вигляді розкладу у ряд Тейлора і утримуються тільки ті компоненти, котрі можуть бути точно описані на базі прийнятого закону заповнення переміщень.

Формально, процедура отримання приблизних формул для деформацій криволінійних та прямолінійних СЕ, незалежно від порядку поліноміального заповнення та їх форми, полягає у наступному:

1. Функції переміщень СЕ уявляються у вигляді степеневих рядів, до того ж поряд з прийнятим законом приймається ще й пробний, який отримується на базі основного шляхом доповнення його до повного полінома, ступінь котрого на одиницю вище максимального ступеня основного.
2. Прийнятий і пробний закони підставляються в формули Коші для деформацій і виконується розкладення кожної складової тензора деформацій в узагальнений ряд Тейлора відносно початку координат.
3. Шляхом зіставлення виразів для коефіцієнтів розкладу деформацій в рівняннях Коші на основі прийнятого закону залишаються тільки члени, що збігаються.

За своєю суттю цей варіант МСЕ відноситься до гібридного типу, тобто розкладення виконується одночасно для переміщень і деформацій. Однак, на відміну, в МССЕ спосіб представлення деформацій призведений до суворої відповідності з порядком апроксимації функцій переміщень з таким розрахунком, щоб виключити всі компоненти деформацій що реагують на жорсткі зміщення при збереженні геометричної незмінності системи.

Досвід використання МССЕ при розрахунках великої кількості криволінійних конструкцій, особливо чутливих до врахування жорстких зміщень, повністю підтвердив високі показники відносно швидкості збіжності і економічності.

У розрахунках на міцність елементів конструкцій і споруд з тріщинами відправною точкою є дослідження розподілу напруг і деформацій, що виникають в них під дією прикладених навантажень. В рамках лінійної механіки руйнування, що виходить із моделі ідеального пружного тіла і представляє тріщину у вигляді розрізу нульової товщини, поверхні якого вільні від напружень, розглянута задача зводиться до крайової задачі теорії пружності.

Для обчислення впливу пластичних деформацій на параметри тріщиноутворення в роботі використовується відомий непрямий метод J -інтегралу [11].

Процес розповсюдження тріщин в ректифікаційних колонах є нелінійний і залежить від часу розвитку тріщини, що в свою чергу впливає на внутрішній тиск в колоні і на швидкість розповсюдження тріщини.

В роботі прийнято, що приріст розкриття тріщини згідно Ірвіну [12] становить половину зони пластичності:

$$r_p = \frac{\sigma^2 l_{cr}}{2\pi\sigma_T^2}, \text{ м}, \quad (1)$$

де σ — тангенційні напруження в колоні, Па; l_{cr} — довжина тріщини, м; σ_T — межа пластичності для матеріалу колони, Па.

Втрати повітря, яке виходить з колони скрізь тріщину, знаходяться через відоме співвідношення [13]:

$$G = \frac{0,0404\mu f p_1}{\sqrt{T_1}}, \text{ кг}, \quad (2)$$

де μ — коефіцієнт витрат; f — площа поверхні розкриття тріщини, м²; p_1 — абсолютний тиск в колоні, Па; T_1 — температура повітря, К.

3. Результати досліджень процесу розповсюдження тріщини в просторових конструкціях на прикладі колони ректифікації

На базі комплексу АПРОКС розроблено параметризовану систему інформаційної підтримки життєвого циклу для ректифікаційної колони К-102 (рис. 1). Це дає можливість досліджувати процеси деформування колони ректифікації під час її експлуатації та при випробуваннях, які проводяться для перевірки можливості подальшого безпечного використання колони.

В системі інформаційної підтримки життєвого циклу реалізовано алгоритм SA333_FORT для чисельного моделювання процесу зародження та розповсюдження магистральних тріщин в корпусі ректифікаційної колони.

Алгоритм складається з наступних блоків:

- 1) блок побудови параметризованої розрахункової схеми конструкції з початковою тріщиною, (або без тріщини);
- 2) блок розрахунку конструкції з тріщиною на міцність;
- 3) блок аналізу просунення тріщини на основі критерію (1);

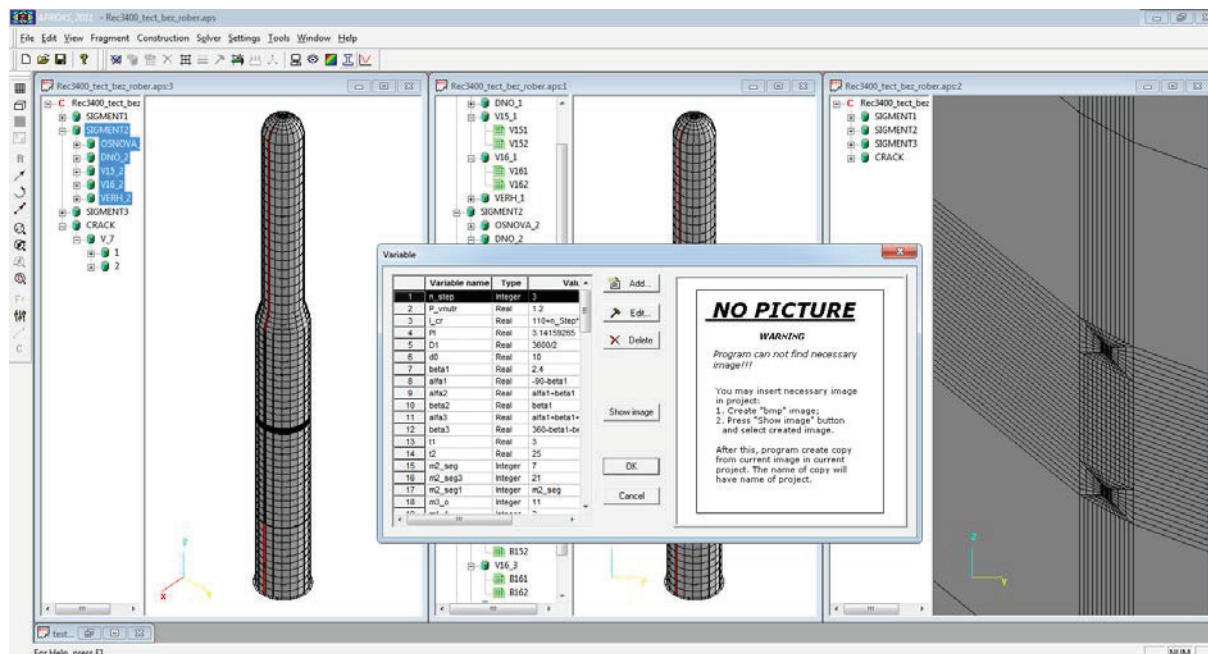


Рис. 1. Система інформаційної підтримки життєвого циклу для ректифікаційної колони

4) блок визначення параметрів тріщиноутворення, які базуються на основі результатів попереднього кроку. Визначення нових параметрів тиску в колоні згідно (2) та розрахунків нової довжини тріщини;
5) блок обробки результатів чисельного моделювання та отримання графіків залежностей основних параметрів розповсюдження тріщини у часі.

Чисельне моделювання процесу розповсюдження тріщини в колоні ректифікації дало можливість визначити не тільки кількісні параметри руйнування, такі як швидкість розповсюдження тріщини, а також в'янути основні етапи її еволюційного розвитку. Встановлено, що з початку при високому тиску збільшення параметру ширини розкриття тріщини змінюється відповідно з експоненціальним законом (рис. 2, а). В подальшому за рахунок падіння внутрішнього тиску відбувається сповільнення параметрів росту ширини розкриття тріщини, і після досягнення максимального розкриття (рис. 2, б), починається процес закриття берегів тріщини з відповідним збільшенням її загальної

довжини (рис. 2, в). Кінцевий етап нелінійного процесу руйнування характеризується повною зупинкою руху устя тріщини і поступовим зменшенням величини параметру її розкриття (рис. 2, г). Цей процес продовжується до моменту повного падіння тиску в ректифікаційній колоні.

На рис. 3 відображено залежність зміни довжини тріщини від часу. Із графіка видно, що ця залежність носить суттєво нелінійний характер, оскільки довжина тріщини залежить від внутрішнього тиску, а жорсткість конструкції змінюється відносно зросту довжини тріщини.

Можна виділити три основні ділянки розвитку тріщини: зародження тріщини, розвиток і зупинення розвитку.

На рис. 4 приведено залежність зміни внутрішнього тиску від часу. Із графіка видно, що цей процес є також суттєво нелінійний і має свої особливості. Тиск змінюється в залежності від витікання повітря через тріщину, що в свою чергу залежить від довжини тріщини.

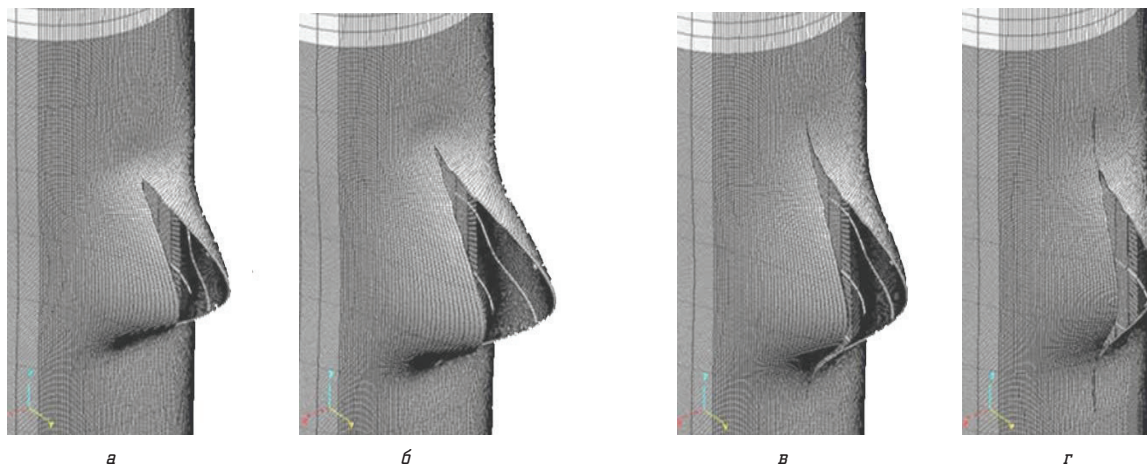


Рис. 2. Процес розповсюдження тріщини в ректифікаційній колоні: а — бурхливий ріст; б — максимальне розкриття; в — сходження берегів; г — деформований стан ректифікаційної колони при нульовому тиску

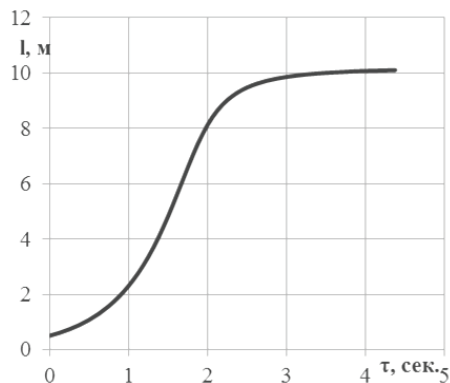


Рис. 3. Залежність довжини тріщини l від часу τ

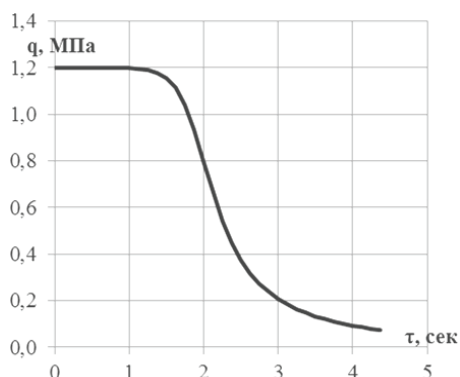


Рис. 4. Залежність внутрішнього тиску q від часу τ

На рис. 5 приведено залежність зміни ширини розкриття берегів тріщини від її довжини. Цей нелінійний процес має свої особливості, які викликані зміною тиску залежно від довжини тріщини що впливає на жорсткість конструкції. Екстремум на діаграмі визнаний тим, що спочатку гнучкість конструкції по мірі росту тріщини росте швидше, ніж падає тиск в колоні, а потім тиску вже не вистачає і тріщина починає закриватись.

На рис. 6 приведено залежність зміни довжини тріщини від тангенціальних напружень в конструкції. Із графіка видно, що цей процес є суттєво не лінійний і має свої особливості. При зародженні тріщини тангенціальні напруження досягають свого максимуму та зі збільшенням довжини починають поступово змінюватись, в залежності від внутрішнього тиску, який залежить від розкриття тріщини і часу розвитку тріщини. При повному розкритті тріщини тиск досягає свого мінімуму.

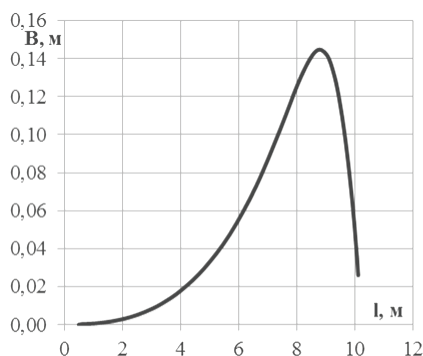


Рис. 5. Залежність ширини розкриття берегів тріщини B від її довжини l

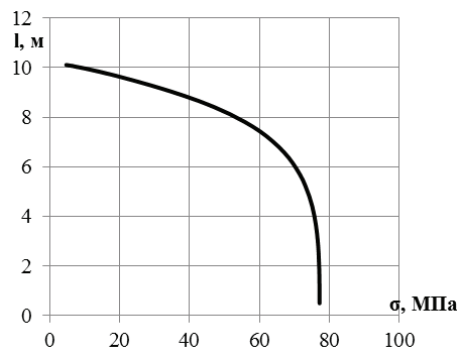


Рис. 6. Залежність довжини тріщини l від тангенціальних напружень в конструкції σ

4. Висновки

На базі системи для розрахунків на міцність АПРОКС розроблена система безперервної інформаційної підтримки обладнання хімічної промисловості. Розроблено алгоритм моделювання процесу руйнування багатошарових просторових конструкцій. Алгоритм апробований шляхом вирішення тестових і прикладних завдань. Досліджено та наведено результати процесу розповсюдження тріщини в ректифікаційній колоні, відтворено процес розвитку магістральної тріщини. На основі отриманих результатів було виявлено нелінійні залежності параметрів розповсюдження тріщин.

Проведено дослідження колони ректифікації, яке показало, що при чисельному відтворенні процесу її руйнування результати розрахунку залишкового розкриття тріщини відрізняються не більше ніж на 10 % порівняно з результатом, зафіксованим після аварії на реальному об'єкті. Це свідчить про те, що основні параметри розповсюдження тріщин у ректифікаційній колоні враховані вірно.

Система АПРОКС може бути рекомендована до практичного впровадження при проектуванні та експлуатації обладнання хімічного машинобудування та нафтопереробної промисловості.

Література

1. Mayer, G. Risk analysis determines priorities among pipe-replacement projects [Text] / G. Mayer, H. J. van Dyke, C. Myriek // Oil and Gas Journal. — 1987. — V. 85, No 38. — P. 100–104.
2. Statyukha, G. Assessment explosion-proof and fire risk industrial targets in a context of strategy of sustainable development [Text] / G. Statyukha, M. Pidmohilnyy, T. Bojko, V. Bendyug // Summaries of 16th International Congress of Chemical and Process Engineering «CHISA 2004». — Praha (Czech Republic), 2004. — P. 5–70.
3. Bieffer, G. The stepwise cracking of pipe line steel in sour environments [Text] / G. Bieffer // Materials performance. — June 1982. — P. 19–34.
4. Lyons, W. C. Standard Handbook of Petroleum and Natural Gas Engineering [Text] / W. C. Lyons. — Gulf Publishing Company, 1996. — P. 297–360.
5. Alami, R. Contrôle Par Gamma-Ray Scanning de la Colonne de Distillation Atmosphérique [Text] / R. Alami, A. Bensitel, M. El Ouazzani, M. Abidate, M. Darouich // 91.C.100 de la SAMIR — Mohammedia, Morocco, Technical Report, CNESTEN-DIAIRI, May 2002. — P. 92–95.
6. Мухин, В. Н. Исследование причин хрупких разрушений биметаллических аппаратов [Текст] / В. Н. Мухин, Л. Е. Ватник // НТПС «Эксплуатация оборудования». — 1983. — № 1. — С 3–7.

7. Aziz, A. K. *Mathematical Foundations of the Finite Element Method with Applications to Partial Differential Equations* [Text] / A. K. Aziz, I. M. Babuska. — New York: Academic Press, 1972. — P. 12–32.
8. Мухин, В. Н. Особенности экспертизы промышленной безопасности биметаллических сосудов и аппаратов [Текст] / В. Н. Мухин, Ю. Н. Самохин, А. В. Гришин // Химическая техника. — 2010. — № 5. — С. 20–24.
9. Киричевский, В. В. Нелинейные деформации термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров [Текст] / В. В. Киричевский, А. С. Сахаров. — К.: Будівельник, 1992. — С. 209–215.
10. Сахаров, А. С. Моментная схема конечных элементов (МСКЭ) с учетом жестких смещений [Текст] / А. С. Сахаров // Сопротивление материалов и теория сооружений. — К.: Будівельник, 1974. — Вып. 24. — С. 147–156.
11. Tieraan, M. Computing of Stress Intensity Factor using J-Integral Method with F.E.A [Text] / M. Tieraan, L. Baltes // Annals of DAAAM 2009, Proc of the 20th Int. DAAAM Symp, 2009. — P. 1105–1106.
12. Броек, Д. Основы механики разрушения [Текст]: пер. с англ. / Д. Броек. — М.: Высш. школа, 1980. — С. 365–368.
13. Герц, Е. В. Пневматические устройства и системы в машиностроении [Текст]: справочник / Е. В. Герц. — М.: Машиностроение, 1981. — С. 281–288.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТРЕЩИН В БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

В работе, на базе комплекса АПРОКС, путем интегрирования уравнений движения во времени, в зависимости от параметров трещинообразования, выполняется численное моделирование процесса распространения трещины в многослойных оболочечных конструкциях. Расчеты, на примере колонны ректификации, проводились при номинальном и испытательном режиме нагрузки. На основе полученных результатов были обнаружены нелинейные зависимости параметров распространения трещин.

Ключевые слова: АПРОКС, трещина, численное моделирование, многослойные оболочечные конструкции, колонна ректификации.

Гондляр Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, кафедра химического, полимерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: avg_ru@mail.ru.

Нікітін Роман Євгенович, кафедра химического, полимерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: nromik@gmail.com.

Онопrienko Владислав Юрійович, кафедра химического, полимерного та силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Україна, e-mail: ixtofobius@mail.ru.

Гондляр Александр Владимирович, доктор технических наук, профессор, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Никитин Роман Евгеньевич, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Онопrienko Владислав Юрьевич, кафедра химического, полимерного и силикатного машиностроения, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Украина.

Gondlyakh Alexander, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: avg_ru@mail.ru.

Nikitin Roman, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: nromik@gmail.com.

Onoprienko Vladyslav, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Ukraine, e-mail: ixtofobius@mail.ru.

УДК 621:311

**Мартиняк М. А.,
Мисак Й. С.**

РОЗРОБКА МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Актуальною задачею на сьогоднішній день є вибір оптимального джерела енергії для забезпечення ефективного її використання, а також дослідження та визначення ефективності використання теплової енергії в децентралізованих системах теплопостачання. В статті приведений аналіз роботи децентралізованої системи теплопостачання та метод розрахунку ефективності її роботи.

Ключові слова: децентралізована система теплопостачання, джерело енергії, тепловий споживач, коефіцієнт корисної дії системи.

1. Вступ

Призначення систем теплопостачання полягає в забезпеченні тепловою енергією побутових та промислових об'єктів з відповідними параметрами енергоносія.

В децентралізованих системах теплопостачання система генерації теплової енергії та тепловий споживач

об'єднанні в один об'єкт або розміщені один від одного на незначній відстані.

Дослідження та визначення ефективності використання теплової енергії в децентралізованих системах теплопостачання є важливою задачею забезпечення ефективного використання енергії. Мінімізація витрати теплової енергії та визначення економічності роботи