

УДК 539.3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ І РЕСУРСУ ГЕНЕРАТОРА ВОДНЮ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

П. П. Гонтаровський, канд. техн. наук

gontarpp@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8503-0959

Н. В. Сметанкіна, д-р техн. наук

nsmetankina@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9528-3741

Н. Г. Гармаш, канд. техн. наук

garm.nataly@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4890-8152

І. І. Мележик, канд. техн. наук

melezhyk81@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8968-5581

Т. В. Протасова, канд. техн. наук

tatyprotasova@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1489-2081

Інститут проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків,
вул. Пожарського, 2/10

Для дослідження водневого термобарохімічного впливу на ідентифікацію видобутку вуглеводнів створено експериментальний комплекс, який дає змогу відтворити хіміко-технологічні процеси, максимально наближені до реальних пластових. Цей комплекс дозволяє досліджувати кінетику протікання не лише водневого і термобарохімічного впливу, а й інших термогазохімічних процесів, у тому числі з генеруванням водню. Головним елементом експериментального комплексу є генератор водню, складові якого працюють при високих тисках і температурах в умовах водневого окрихчування механічних властивостей і агресивного середовища, що породжує корозію його внутрішньої поверхні. Виходячи з цього набуває актуальності розробка методики розрахунку термонапруженого стану генератора, його міцності в умовах водневого окрихчування й ресурсу. На основі методу скінченних елементів запропоновано методику розрахунку нестационарних температурних полів і термонапруженого стану, що мають місце в генераторі водню при протіканні термобарохімічних процесів різної інтенсивності. Методика дозволяє враховувати особливості геометрії конструкції, змінні за часом розподіли температур і тиску продуктів реакції, залежність від температури теплофізичних і механічних властивостей матеріалу генератора водню. Завдяки застосуванню розробленого програмного забезпечення проведено дослідження термонапруженого стану генератора водню при протіканні двох реальних термобарохімічних процесів різної інтенсивності. Використано графіки зміни за часом температур і тиску продуктів реакції гідрореагуючих речовин у генераторі, які було зареєстровано при протіканні експерименту. Отримано розподіл нестационарних температурних полів і напружень в елементах генератора водню. Визначено області максимального навантаження елементів генератора. Установлено, що при протіканні досліджених термобарохімічних процесів більший внесок у термонапружений стан дає тиск. Одержані результати й розроблені методичне і програмне забезпечення можуть використовуватися при дослідженні генераторів інших конструкцій з іншими термобарохімічними процесами, що протікають у них.

Ключові слова: генератор водню, термобарохімічний процес, температурні поля, термонапружений стан, ресурс.

Вступ

Найбільш ефективними технологіями підвищення видобутку вуглеводнів є ті, що поєднують тепловий, хімічний та механічний впливи на продуктивний горизонт. Одна з найперспективніших технологій ґрунтується на ефекті водневої активації процесів у пористому середовищі продуктивного горизонту під час протікання екзотермічної реакції у свердловині [1, 2].

В ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України створено експериментальний комплекс для дослідження водневого термобарохімічного впливу, який дає змогу відтворити хіміко-технологічні процеси, максимально наближені до реальних пластових [3]. Цей комплекс дозволяє вивчати кінетику протікання не тільки водневого і термобарохімічного впливу на ідентифікацію видобутку вуглеводнів, а й інших термогазохімічних процесів, у тому числі з генеруванням водню. Методика проведення експериментів ґрунтується на послідовному змішуванні в реакторі двох технологічних рідин, вимірюванні й фіксації основних параметрів протікання термобарохімічного процесу й відтворює його максимально близько до реального, тобто такого, що має місце в свердловині [4].

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.

© П. П. Гонтаровський, Н. В. Сметанкіна, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик, Т. В. Протасова, 2022

Найважливішим і відповідальним елементом експериментального комплексу є генератор водню. Його складові постійно зазнають впливу високих тисків і температур в умовах водневого окрихчування механічних властивостей і агресивного середовища, що викликає корозію його внутрішньої поверхні. Виходячи з цього, розробка методики розрахунку термонапруженого стану генератора, в якій беруться до уваги реальні умови навантаження, його міцність й ресурс, є актуальною і важливою задачею.

При експлуатації металевих конструкцій через їх взаємодію з навколишнім середовищем відбувається руйнування поверхні: агресивне середовище проникає в об'єм металу, що призводить до погіршення його механічних характеристик, зміни напружено-деформованого стану, несучої здатності й до зменшення ресурсу конструкцій. Процес корозії суттєво активується під дією розтягуючих напружень [5, 6].

Зауважимо, що небезпечність цього виду корозії полягає в тому, що виявити її у конструктивних елементах дуже складно, а устаткування у низці випадків виходить із ладу за короткий час. Пояснюється це тим, що корозійні тріщини направлені перпендикулярно розтягуючим напруженням, а час до руйнування при цьому залежить від рівня розтягуючих напружень [5]. Крім того, корозійне розтріскування часто супроводжується водневим окрихчуванням, що призводить до крихкого руйнування елементів конструкцій [7].

Додамо, що водневе середовище досить агресивне, причому шкідлива дія водню на метал проявляється у зниженні його міцнісних і пластичних властивостей [6]. Це може стати причиною катастрофічного крихкого руйнування конструкцій, які при реальному навантаженні мають достатній запас міцності.

Установлено, що розвиток наявних і зародження нових дефектів різко прискорюються в умовах тривимірного напруженого стану. Отже, оцінка термонапруженого стану генератора водню має важливе значення, оскільки він постійно працює під дією високого тиску і температур.

Постановка задачі розрахункових досліджень міцності і ресурсу термохімічного генератора водню

Циліндричний реактор генератора водню, що являє собою порожнистий циліндр довжиною приблизно 1,5 м, зовнішнім діаметром 73 мм і внутрішнім 62 мм, виготовлено із сталі 40Х. Схема реактора водню зображена на рис. 1. Внутрішній об'єм реактора розділено кульовим краном 2 на нижню і верхню камери. Реактор оснащений системою попереднього нагріву. Термометрія здійснюється термопарами.

У верхній камері розміщується технологічна рідина з більшою густиною для змішування в нижній камері з рідиною з меншою густиною. Реактор забезпечено блоком заданого початкового тиску, що дозволяє моделювати термобарохімічні процеси.

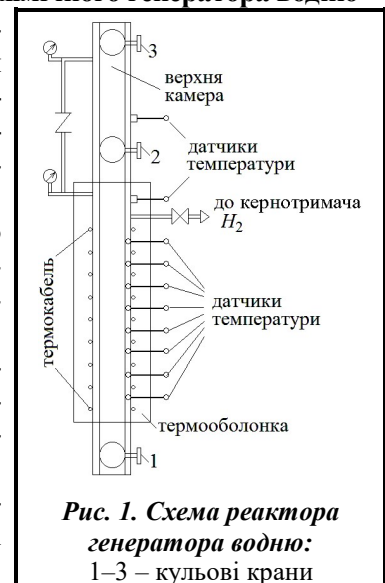
Вимірювання температури у зоні хімічної реакції, а також температури продуктів реакції, у тому числі газоподібних, здійснюється термопарами. Реактор опресовується на тиск 100 МПа. Він розрахований на тиски до 50 МПа і температури до 400 °С (для короточасної дії – до 600 °С).

У процесі проведення досліджень постійно здійснюється контроль за показниками температур і тисків, які зберігаються у вигляді графіків для подальшого перегляду й аналізу отриманих результатів.

Візуалізація теплових термобарохімічних процесів, що відбуваються у реакторі, зображена на рис. 2 і рис. 3. Таким чином, реакція протікає протягом проміжку часу від 9 до 45 хв. У конструкції реактора встановлено запобіжний скидний клапан механічного типу, налаштований на тиск 50 МПа.

Технологічна рідина ТРС-1 густиною від 1,35 до 1,55 г/см³ розміщена на дні реактора, рідина ТРС-2 густиною від 1,6 до 1,9 г/см³ – у верхній камері. Потім у реакторі нагнітається високий тиск. Після вирівнювання тиску у верхній і нижній камерах відкривається кран 2 (рис. 1), рідина ТРС-2 під дією сили тяжіння витікає до нижньої камери і розпочинається багатостадійний хімічний процес.

Таким чином, у реакторі відбуваються нестационарний процес навантаження внутрішнім тиском (графік 5 рис. 2 і рис. 3) і зміна за часом температури продуктів реакції (графіки 1, 2, 3, 4 рис. 2 і рис. 3).



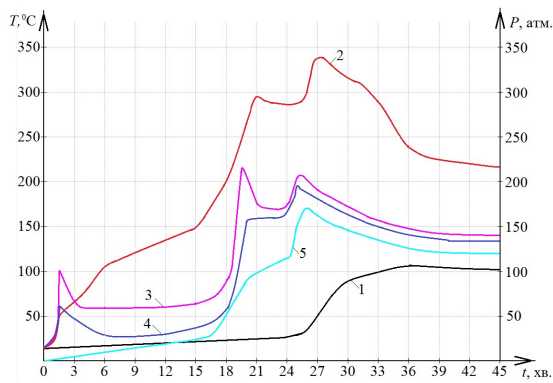


Рис. 2. Візуалізація термобарохімічного процесу з базовим складом компонентів гідрореагуючих речовин:
 1 – T , °C у зоні реакції; 2 – T , °C газоподібних продуктів реакції; 3, 4 – T , °C парогазорідинної фази; 5 – тиск

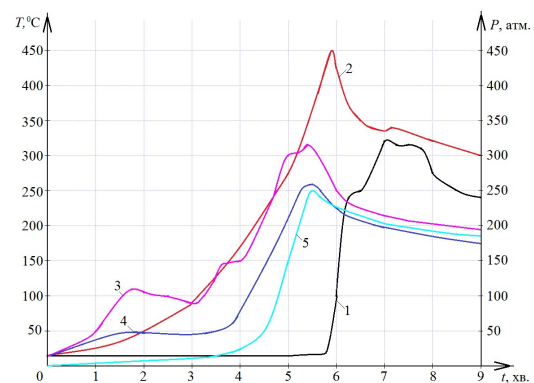


Рис. 3. Термобарохімічний процес з активацією гідрореагуючої речовини та полімерними нітрилами:
 1 – T , °C у зоні реакції; 2 – T , °C газоподібних продуктів реакції; 3, 4 – T , °C парогазорідинної фази; 5 – тиск

Для розрахунку термонапруженого стану корпусу реактора водню необхідно розв'язати нестационарну задачу теплопровідності при змінних за часом і висотою граничних умовах теплообміну третього роду (задаються температура $T(h, \tau)$, °C продуктів реакції і коефіцієнти теплообміну на внутрішній поверхні $\alpha(h, \tau)$), що для одержання температурного поля реактора здійснюється неявним покроковим методом Кренка-Ніколсона з використанням методу скінченних елементів [8]. При цьому задаються властивості теплопровідності $K(T, \text{°C})$ й об'ємної теплоємності $\rho c(T, \text{°C})$ сталі 40Х залежно від температури [8, 9].

На кожному кроці за часом після розв'язання задачі теплопровідності розв'язується задача термопружності. При цьому враховується навантаження від тиску на внутрішню поверхню, яке змінюється на кожному кроці за часом, а також температурне розширення матеріалу корпусу реактора [9].

При розрахунках міцності корпусу реактора необхідно зважати також на окрихчування і зменшення границі міцності сталі 40Х за рахунок наводнення [10, 11, 12].

Оскільки продукти термобарохімічної реакції є агресивним середовищем, із внутрішньої поверхні реактора розвивається корозія матеріалу, яка зменшує несучу товщину стінки корпусу реактора, що впливає на його ресурс. Процес і вид корозії залежать від багатьох факторів.

Розрахункова модель для визначення нестационарного температурного поля і термонапруженого стану генератора водню методом скінченних елементів

Конструкція реактора генератора водню зображена на рис. 1. Меридіональний переріз конструкції генератора представлено на рис. 4. Дискретизація на скінченні елементи середнього фрагмента меридіонального перерізу конструкції, який включає муфту і кульовий кран, показана на рис. 5.

Вдоль осі z у циліндричній системі координат $r\theta z$ дискретизація налічує 127 скінченних елементів. Осесиметрична розрахункова схема від середини нижнього до середини верхнього кульового крана вздовж осі має координати $0 < z < 190$ см. Нижній кінець $z=0$ закріплено ($u_z=0$), а на верхньому $z=190$ см прикладені осьові напруження

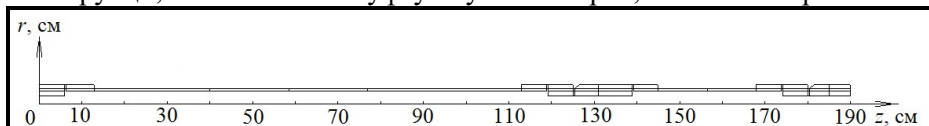


Рис. 4. Меридіональний переріз конструкції генератора

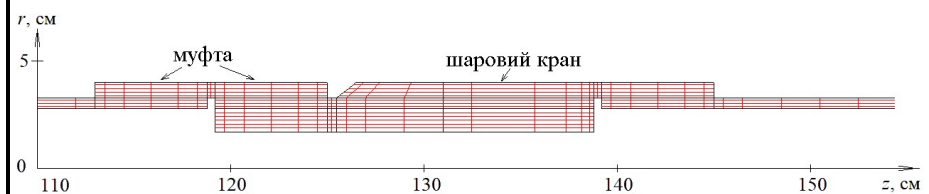


Рис. 5. Дискретизація на скінченні елементи середнього фрагмента меридіонального перерізу конструкції, який включає муфту і кульовий кран

$$\sigma_z = \frac{P \cdot \pi \cdot r_g^2}{\pi(r_n^2 - r_g^2)} = \frac{P \cdot 1,9^2}{(4,45^2 - 1,9^2)} \text{ МПа} = 0,2229 \cdot P \text{ МПа},$$

де P – тиск всередині реактора, який змінюється за часом згідно з графіком 5 на рис. 2 і 3 при протіканні термобарохімічного процесу.

Теплофізичні властивості сталі, які залежать від температури, наведено в табл. 1.

Механічні властивості сталі 40ХН надано в табл. 2, де $\rho=8 \cdot 10^{-8}$ – густина матеріалу; $A_{11} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$; $A_{12} = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$;

$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$; E – модуль Юнга; ν – коефіцієнт Пуасона; α – коефіцієнт лінійного температурного розширення сталі. Із використанням розробленого програмного забезпечення [9, 10] виконано розрахунки нестационарного температурного стану генератора водню для двох випадків протікання термобарохімічних процесів, зображених на рис. 2 і 3.

Температура продуктів реакції задається вздовж осі z кусочно-постійним законом. На відрізку $0 < z < 40$ см приймається температура, яка має місце в зоні реакції, на відрізках $40 < z < 58,5$ см і $58,5 < z < 77$ см – температура газорідної фази реакції, а на відрізку $77 < z < 190$ см – температура газоподібних продуктів реакції.

Температура продуктів реакції змінюється за часом згідно з графіками 1–4 на рис. 2 і 3, для яких приймається апроксимація по кусково-лінійному закону. Коефіцієнти теплообміну на внутрішній поверхні реактора приведено для двох варіантів теплообміну, які вздовж осі z змінюються за кусково-лінійним законом, наведеним в табл. 3. Менші значення теплообміну приймаються для термобарохімічного процесу, зображеного на рис. 2, а більші – на рис. 3.

На зовнішній поверхні реактора температура повітря приймається рівною 20 °С, а коефіцієнти теплообміну $\alpha=0,005$ Вт/(см²·град).

При виконанні розрахунків в обох випадках кількість рівномірних кроків за часом дорівнювала 30.

Термонапружений стан генератора водню при протіканні термобарохімічного процесу протягом 45 хв із базовим складом гідрореагуючих речовин

Зміна за часом температур продуктів реакції і тиску в генераторі зображена на рис. 2. У зоні реакції і в зоні парогазорідної фази продуктів реакції прогрів тонкостінних елементів реактора відбувається майже в квазістационарному режимі через значні коефіцієнти теплообміну. У моменти часу від 18 до 21 хв, коли швидкість зміни температури продуктів реакції максимальна (близько 70 °С за хвилину), зміна температури металу відстає від температури продуктів реакції на 5 – 10 °С, а перепад температури по товщині стінки товщиною $5,5$ мм становить 1 – 2 °С.

У зоні газоподібних продуктів реакції, де їх температура в момент часу $t=28$ хв досягає 335 °С і вище, максимальна температура металу труби нижча за температуру газу на 30 °С, а перепад температури по товщині стінки складає близько двох градусів. Максимальні осьові і окружні напруження при цьому дорівнюють $\sigma_z=60$ МПа, $\sigma_\theta=100$ МПа відповідно, інтенсивність напружень $\sigma_I=110$ МПа.

$T, ^\circ\text{C}$	20	100	200	300	400	450
$k_{\eta}=k_z, \text{Вт}/(\text{см}\cdot\text{град})$	0,48	0,46	0,427	0,423	0,385	0,37
$\rho C, \text{Дж}/\text{см}^3$	3,8	3,9	4,1	4,4	4,6	4,7

$T, ^\circ\text{C}$	20	200	300	400	450
$\alpha \cdot 10^{-5}, 1/\text{град}$	1,19	1,25	1,32	1,38	1,395
$A_{11}, \text{МПа}$	269230	282690	269230	263616	249038
$A_{12}, \text{МПа}$	115385	121134	115385	109615	106731
$G, \text{МПа}$	76969	80769	74623	73076	71154

$z, \text{см}$	0	40	58,5	77	190
$\alpha, \text{Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{град})$	0,1	0,15	0,2	0,175	0,035
	0,2	0,25	0,3	0,15	0,05



Рис. 6. Розподіл температури по поперечному перерізу для моменту часу $t=28$ хв у районі середнього кульового крана

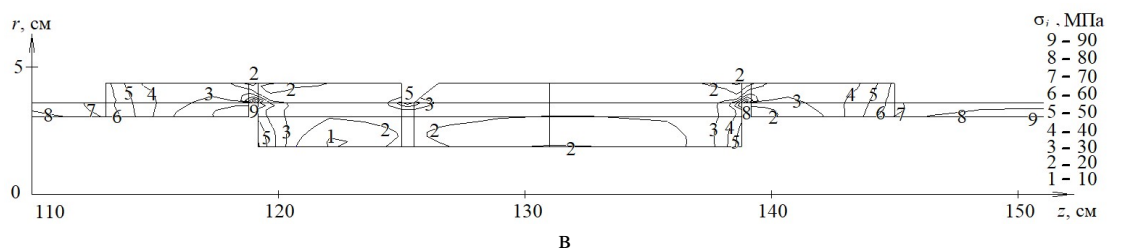
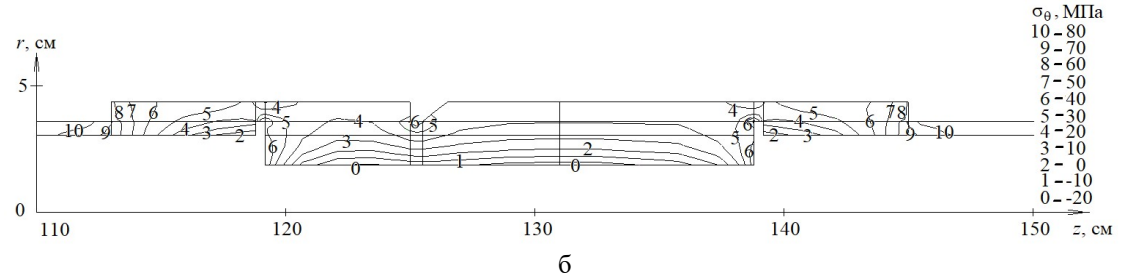
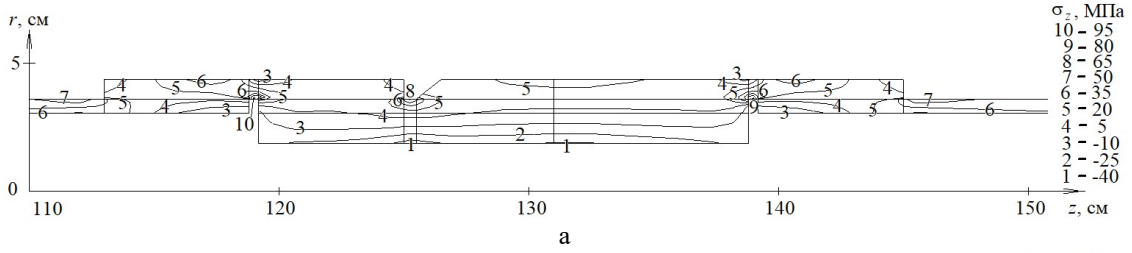


Рис. 7. Розподіл напружень в районі середнього кульового крана для моменту часу $t=28$ хв:
 а – осьові напруження; б – окружні напруження; в – еквівалентні напруження

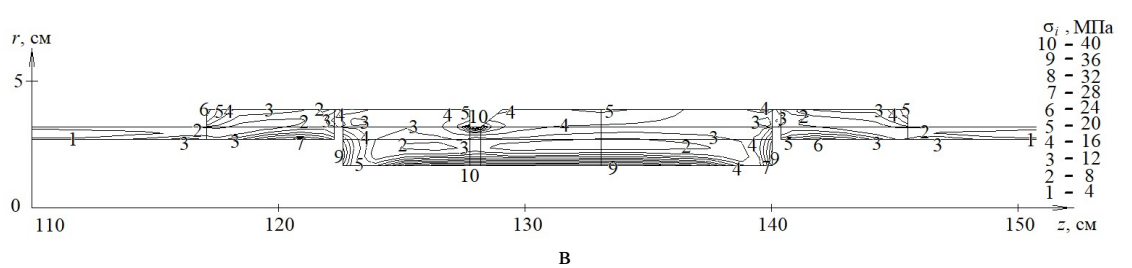
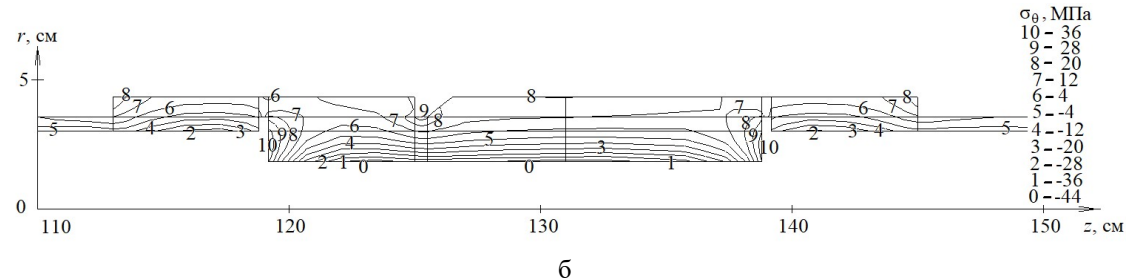
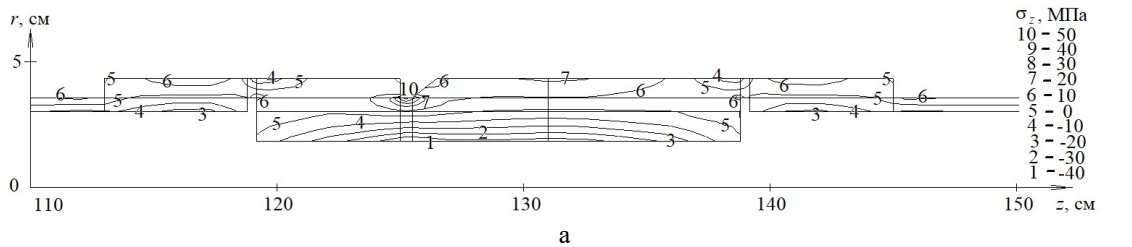


Рис. 8. Розподіл температурних напружень у районі середнього кульового крана:
 а – осьові напруження; б – окружні напруження; в – еквівалентні напруження

У районі муфти і кульового крана, де площі поперечного перерізу елементів реактора водню різко збільшуються, метал не встигає прогрітися, а отже, його температура має менші значення.

Розподіл температури по поперечному перерізу для цього моменту часу в районі середнього крана зображено на рис. 6.

Розподіл осьових, окружних і еквівалентних напружень, одержаних із використанням критерію Мізеса [8], для моменту часу $t=28$ хв приведено на рис. 7.

Максимальний внесок у напружений стан дає тиск продуктів реакції всередині реактора. Для оцінки внеску температурних деформацій виконано розрахунок при нульовому тиску продуктів реакції.

Максимальні по величині температурні напруження в трубі складають $\sigma_z=25$ МПа, $\sigma_\theta=27$ МПа, $\sigma_r=28$ МПа. Внесок температурних напружень у районі кульового крана значно вищий. Розподіл температурних напружень в області другого кульового крана показано на рис. 8.

Розподіл температур і напружень в області верхнього кульового крана подібний розподілу в районі середнього крана, але максимальні значення помітно нижчі за рахунок менших значень коефіцієнтів теплообміну.

Термонапружений стан генератора водню при протіканні барохімічного процесу з активацією гідрогенеруючих речовин

У випадку барохімічного процесу з активацією гідрогенеруючих речовин час протікання термобарохімічного процесу становить 9 хв. Зміну за часом температур і тиску продуктів реакції в генераторі водню при цьому зображено на рис. 3. Максимальне значення тиску продуктів реакції має місце в момент часу $t=5,7$ хв, а температур металу – при $t=6$ хв.

Температура газоподібних продуктів реакції в момент часу $t=5,7$ хв досягає 419°C і підвищується дуже швидко, тому максимальна температура в трубі реактора, незважаючи на більший коефіцієнт теплообміну, ніж у попередньому випадку, досягає лише 345°C (відстає від температури продуктів реакції на 74°C), а перепад температури по товщині стінки дорівнює 7°C .

У момент часу 6 хвилин температура продуктів реакції дорівнює 430°C , вона досягла максимуму і починає зменшуватися. Максимальна температура металу при цьому досягає 386°C при перепаді по товщині стінки 5°C (відстає від температури продуктів реакції на 44°C). Розподіл температур по поперечному перерізу генератора в районі середнього кульового крана в моменти часу $t=5,7$ і 6 хв приведено на рис. 9.

Максимальні напруження на внутрішній поверхні труби в момент часу $t=5,7$ хв при внутрішньому тиску $24,4$ МПа $\sigma_z=74,6$ МПа, $\sigma_\theta=169$ МПа, $\sigma_r=163$ МПа. У випадку дії лише тиску $P=24,4$ МПа без урахування впливу температури максимальні напруження в трубі становлять $\sigma_z=63,1$ МПа, $\sigma_\theta=150$ МПа, $\sigma_r=147,4$ МПа.

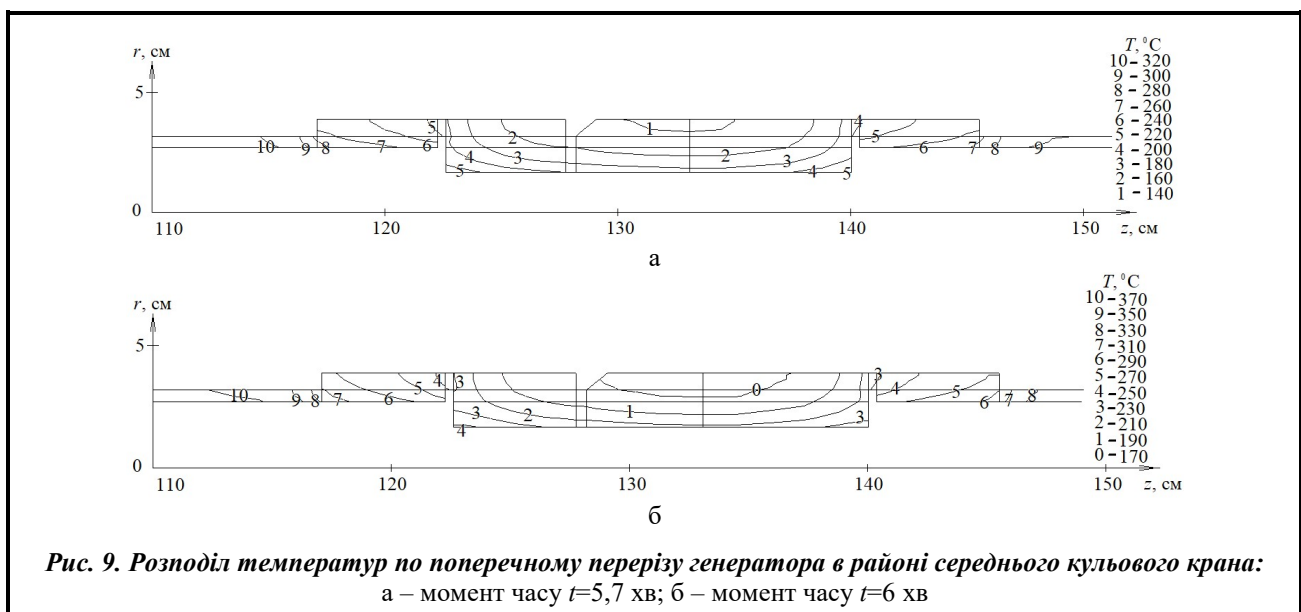


Рис. 9. Розподіл температур по поперечному перерізу генератора в районі середнього кульового крана: а – момент часу $t=5,7$ хв; б – момент часу $t=6$ хв

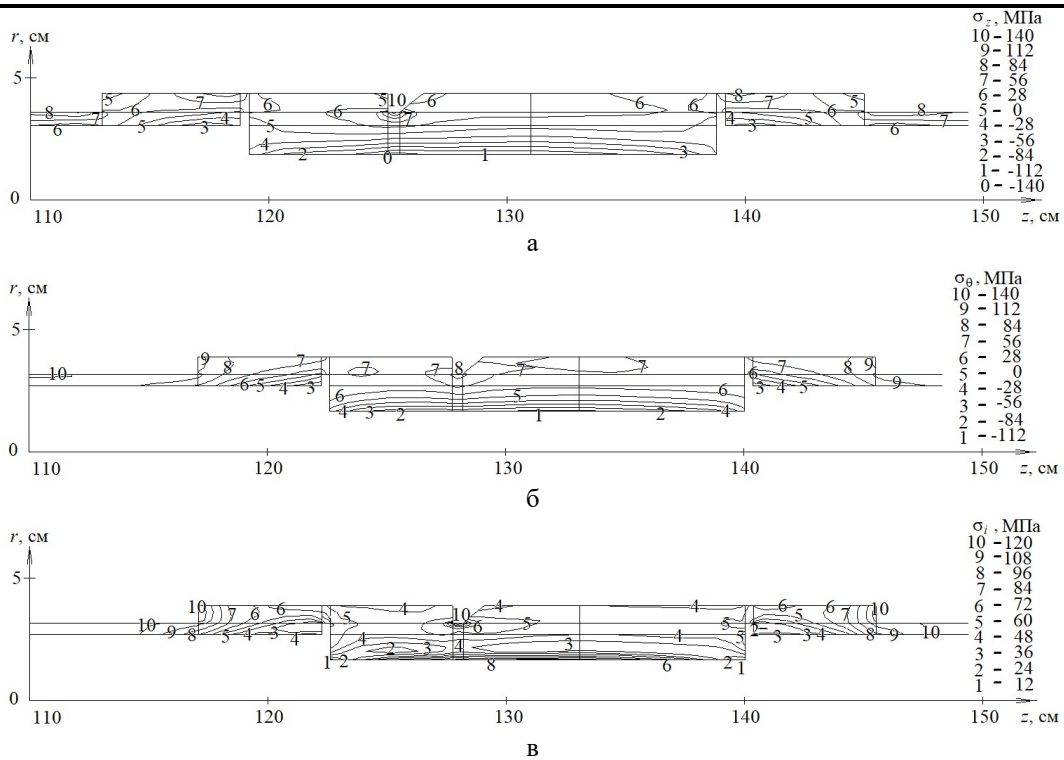


Рис. 10. Розподіл напружень у момент часу $t=5,7$ хв у поперечному перерізі генератора водню в районі середнього крана:
а – осьові напруження; б – окружні напруження; в – еквівалентні напруження

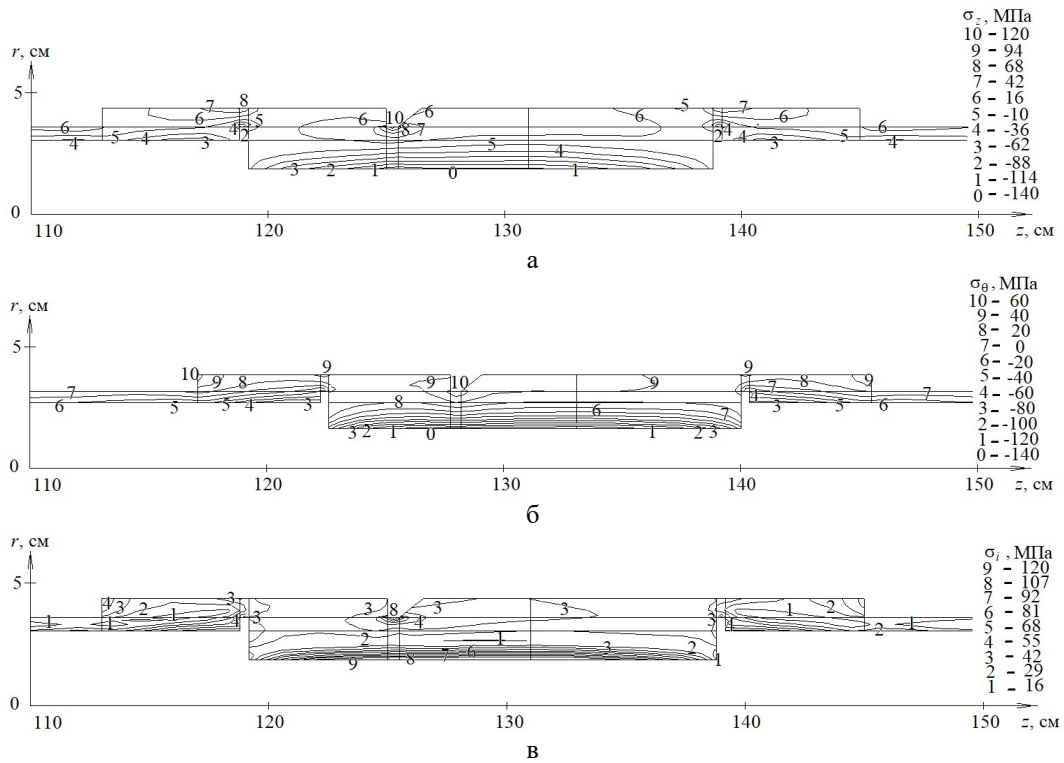
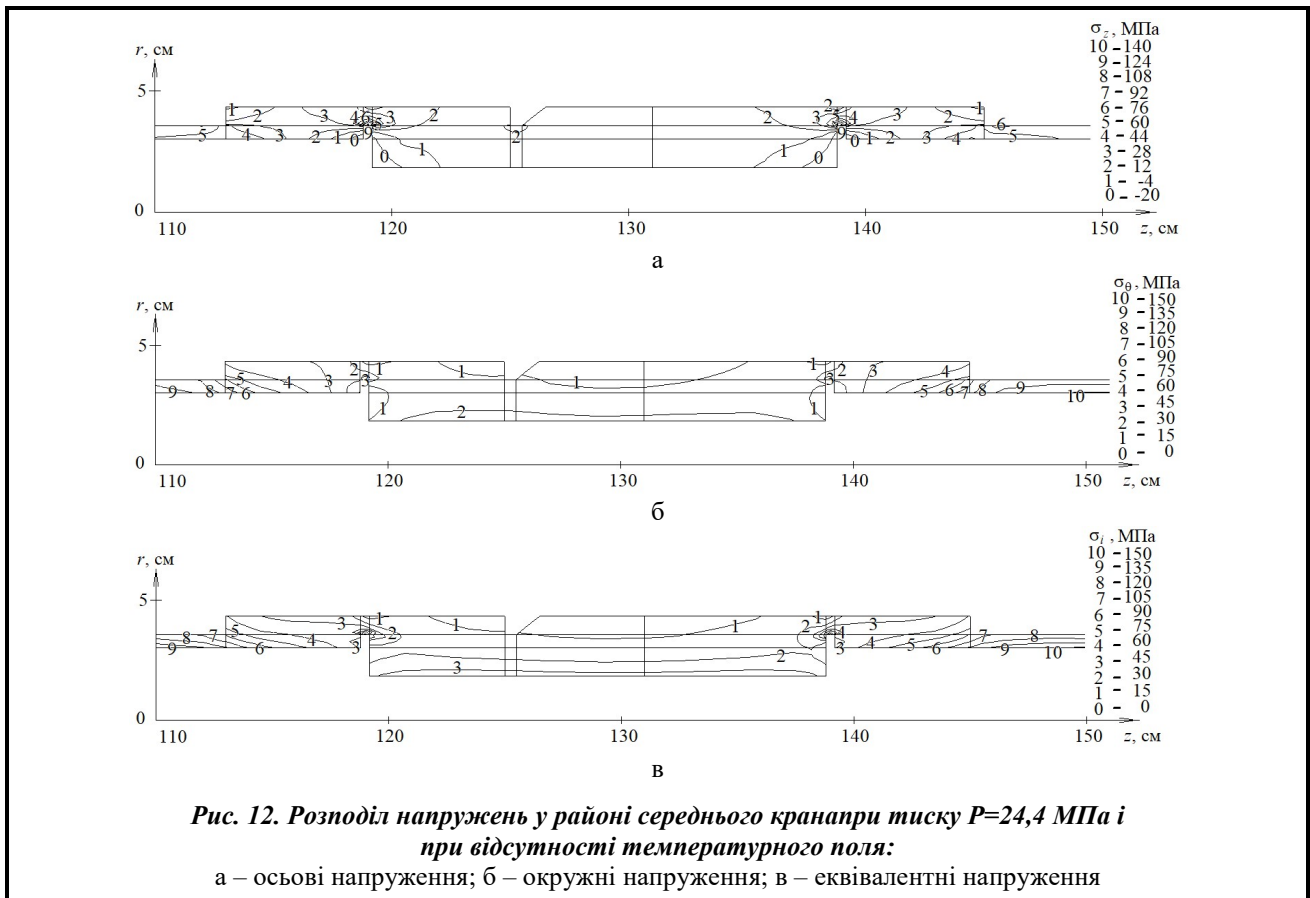


Рис. 11. Розподіл температурних напружень у поперечному перерізі в районі середнього крана генератора при нульовому тиску:
а – осьові напруження; б – окружні напруження; в – еквівалентні напруження



Розподіл напружень у момент часу $t=5,7$ хв у поперечному перерізі генератора водню в районі середнього крана зображено на рис. 10.

Розподіл температурних напружень при нульовому тиску в момент часу $t=5,7$ хв в поперечному перерізі генератора водню в районі середнього крана приведено на рис. 11.

Розподіл напружень у поперечному перерізі в районі середнього крана генератора при тиску $P=24,4$ МПа без урахування температури дано на рис. 12.

Слід відмітити складний розподіл температур і напружень у районі середнього крана генератора. Більший внесок у термонапружений стан має тиск газоподібних продуктів реакції. У той же час в областях різкої зміни площі поперечного перерізу, де спостерігаються значні температурні перепади, суттєвий внесок температурних деформацій.

Подібний розподіл температур і напружень спостерігається також і в районі верхнього крана генератора водню, але їх рівень дещо нижчий за рахунок менших коефіцієнтів теплообміну на внутрішній поверхні.

Висновки

Головною складовою експериментального комплексу, призначеного для дослідження хіміко-технічних процесів, максимально наближених до реальних пластових, які мають місце при інтенсифікації видобутку вуглеводів, є генератор водню. Його елементи працюють при високих тисках і температурах в умовах водневого окрихчування й агресивного середовища. З огляду на це набуває актуальності вивчення термонапруженого стану, міцності й ресурсу.

У роботі на основі методу скінченних елементів представлено методику розрахунку нестационарних температурних полів і термонапруженого стану, що спостерігаються в генераторі водню при протіканні термобарохімічних процесів різної інтенсивності, яка враховує особливості геометрії конструкції, змінні за часом розподіли температур і тиску продуктів реакції, залежність від температури теплофізичних і механічних властивостей матеріалу генератора водню.

Розглянуто конкретну конструкцію і виконано дослідження термонапруженого стану при протіканні двох реальних термобарохімічних процесів різної інтенсивності. При цьому використано графіки зміни за часом температур і тиску продуктів реакції гідрореагуючих речовин у генераторі, зареєстровані при протіканні експерименту.

Отримано нестационарні температурні поля і змінний за часом розподіл напружень в елементах генератора водню.

Визначено моменти і місця максимального навантаження елементів генератора. При протіканні досліджених термобарохімічних процесів більший внесок у термонапружений стан дає тиск.

Генератор має достатній запас міцності в умовах пружних деформацій до границі текучості сталі. Слід відмітити, що генератор може використовуватися за більших від розглянутих значень температур і напружень.

Розроблене методичне й програмне забезпечення може бути використано при дослідженні інших варіантів конструкції генераторів і термобарохімічних процесів, що у них протікають.

Література

1. Велигоцький Д. О., Кравченко О. В. Створення перспективної водневої технології підвищення дебіту та глибини вилучення нафти через використання воденьгенерувальних наносупензій. *Актуальні проблеми та перспективи розвитку геології: наука й виробництво: матеріали V Міжнародного геологічного форуму (ГЕОФОРУМ–2018)*, 18–23 червня, 2018, Одеса. К.: УкрДГРІ, 2018. Т. 2. С. 99–107.
2. Кравченко О. В., Велигоцький Д. А., Авраменко А. Н., Хабибуллин Р. А. Совершенствование технологии комплексного воздействия на продуктивные пласты нефтяных и газовых скважин. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. Т. 6. № 5 (72). С. 4–9. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.29316>.
3. Велигоцький Д. А., Баштовой А. В. Установка для комплексных исследований проницаемости и фильтрационных характеристик кернов горной породы. *Современные проблемы машиностроения: тезисы докладов конференции молодых ученых и специалистов*, 17–20 апреля, 2018, Харьков, ИПМаш им. А. Н. Подгорного НАНУ. Харьков: ИПМаш им. А. Н. Подгорного НАНУ, 2018. С. 30.
4. Kravchenko O., Veligotskyi D., Bashtovyi A., Veligotska Yu. Improving the controllability and effectiveness of the chemical-technological process of the technology for hydrogen thermobaric chemical stimulation of hydrocarbon recovery. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 6. No. 6 (102). P. 57–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.188615>.
5. Овчинников И. И. Исследование поведения оболочечных конструкций, эксплуатирующихся в средах, вызывающих коррозионное растрескивание. *Науковедение*. 2012. № 4. С. 1–30.
6. Василенко И. И., Мелехов Р. К. Коррозионное растрескивание сталей. Киев: Наукова думка, 1977. 264 с.
7. Колачев Б. А. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1985. 216 с.
8. Подгорный А. Н., Гонтаровский П. П., Киркач Б. Н., Матюхин Ю. И., Хавин Г. Л. Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций. Киев: Наукова думка, 1989. 232 с.
9. Hontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Garmash N. H., Melezhyk I. I. Analysis of crack growth in the wall of an electrolyser compartment. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2020. Vol. 23. No. 4. P. 38–44. <https://doi.org/10.15407/pmach2020.04.038>.
10. Hontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Ugrimov S. V., Garmash N. H., Melezhyk I. I. Numerical investigations of the crack resistance of ion-exchange strengthened sheet glass under bending strains. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. Vol. 24. No. 3. P. 27–34. <https://doi.org/10.15407/pmach2021.03.027>.
11. Механіка руйнування та міцність матеріалів: Довід. посіб. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 7: Надійність та довговічність елементів конструкцій теплоенергетичного устаткування / І. М. Дмитрах, А. Б. Вайнман, М. Г. Сташук, Л. Тот. Під ред. І. М. Дмитраха. Київ: ВД «Академперіодика», 2005. 378 с.
12. Hontarovskiy P. P., Smetankina N. V., Ugrimov S. V., Garmash N. H., Melezhyk I. I. Computational studies of the thermal stress state of multilayer glazing with electric heating. *Journal of Mechanical Engineering – Problemy Mashynobuduvannia*. 2022. Vol. 25. No. 2. P. 14–21. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.02.014>.

Надійшла до редакції 10.09.2022