

М. П. Андріішин, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0002-4439-3526
e-mail: andriishinmp@gmail.com;

К. І. Капітанчук, канд. техн. наук, доц.
Національний авіаційний університет
orcid.org/0000-0003-3605-0977
e-mail: k.kapitanchuk@ukr.net;

Н. М. Андріішин
АТ «Укргазвидобування»
orcid.org/0000-0002-5544-9089
e-mail: nazar.andriishin@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГАЗО-ВОДНЕВОЇ СУМІШІ НА ГАЗОТЕРМОДИНАМІЧНІ ПАРАМЕТРИ РОБОТИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

Вступ

У 2019...20 роках Європейська Комісія ввела в дію три стратегічних документи, спрямованих на суттєве підвищення ефективності використання альтернативних джерел енергетики, що повинно призвести до глобального скорочення викидів в атмосферу парникових газів, а саме:

– Європейський зелений курс (The European Green Deal), метою якого є перетворення Європи до 2050 року на нейтральний континент;

– стратегію ЄС з інтеграції енергетичної системи (EU Strategy for Energy System Integration), яка спрямована на підвищення енергоефективності економіки за рахунок створення інтегральної системи енергозабезпечення, що об'єднує в єдине ціле різні джерела, інфраструктуру, споживачів і передбачає широке та ефективне використання місцевих джерел енергії, а також збільшення застосування електроенергії;

– водневу стратегію ЄС (EU Hydrogen Strategy), яка передбачає широке використання водню як енергоносія для тих галузей, які не можна електрифікувати, і має за мету довести викиди вуглекислого газу промисловими об'єктами до нуля [1].

Рада Європейського Союзу задекларувала, що до 2050 року як «відновлювані гази», в основному, будуть вважатися водень (H₂) і біометан. Споживання відновлювальних газів у загальному споживанні країнами ЄС можуть становити до 70 % [2].

Тому особливого значення набуває питання транспортування водню, біометану та суміші природного газу з воднем у різних концентраціях, в якому ЄС розглядає Україну як перспективного та надійного партнера. Водневі національні стратегії та плани вже розроблені або перебувають у стадії підготовки в таких країнах, як Австрія, Бельгія, Німеччина, Латвія, Португалія, Іспанія, Франція, Румунія, Польща, Італія, Нідерланди та Швеція.

У 2020 році Агентство Європейського Союзу з питань співробітництва органів регулювання енергетики ACER підготувало звіт, де проаналізовано національні нормативні бази країн ЄС щодо можливості застосування водню або його суміші з природним газом в газових мережах і підходів до адаптації енергетичної інфраструктури.

Міністерство енергетики України також розробило Концепцію «зеленого» енергетичного переходу України. Дана концепція передбачає досягнення основної мети – зменшення обсягу викидів парникових газів з метою забезпечення переходу до кліматично нейтральної економіки України до 2070 року [3].

Одним із важливих пунктів є поступова декарбонізація енергетики в частині зменшення використання природного газу за рахунок заміщення його газами відновлювальних джерел, у тому числі водню. Зокрема, передбачається збільшення частки синтетичного «зеленого метану»

в процесі транспортування його трубопровідною системою споживачам [4]. Крім того, важливим елементом стратегії є розвиток проектів водневої енергетики в рамках підготовки до програми H₂Ready, тобто впровадження комплексного підходу щодо можливості транспортування в газотранспортних та газопровідних мережах сумішей природного газу з воднем із вмістом останнього до 20 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В Україні успішно запущений пілотний водневий проект регіональної газової компанії [4], здійснення якого передбачає два етапи:

- перший етап – виробництво чистого водню;
- другий етап – транспортування водню трубопроводами.

Питання транспортування розглядається в двох напрямках: подача в трубопровід чистого водню та змішування водню з природним газом у співвідношенні 20 % до 80 %. Окремою складовою реалізації проекту є виготовлення та тестування газового обладнання, яке має працювати та контактувати безпосередньо з воднем. Наразі обладнання, яке успішно пройшло всі етапи випробувань ідентифікують як H₂Ready.

Введення в дію водневої стратегії Європейського союзу [1] та стратегії інтеграції енергетичних систем, покликаних забезпечити плановий підхід до декарбонізації енергетики та визначити роль водню як енергоносія [2, 5], спонукало до того, що деякі оператори газотранспортної системи (ГТС) частково застосовують технології змішування природного газу із воднем в процесі його транспортування магістральними газопроводами. Наприклад, GRTGaz (Франція) повідомляє про цільову суміш 10 % водню в природному газі.

В роботі [4] зазначено, що додавання до природного газу від 1 % до 20 % водню в процесі його транспортування магістральним трубопроводом не вимагає модернізації ГТС, але сприяє значному зменшенню викидів вуглецю при роботі компресорних станцій, які споживають як паливо продукт транспортування. Встановлено вплив об'ємної концентрації водню на основні фізико-хімічні властивості та енергетичну цінність газу-водневої суміші в умовах газових мереж низького тиску.

Оператор ГТС України приєднався до проекту Європейського банку реконструкції та розвитку, щодо оцінки економічного потенціалу водню в країнах Європейського регіону, серед яких значну роль відведено Україні [6].

Даним проектом передбачається проведення оцінки попиту, обсягів виробництва, потенціалу транспортування та розподілу водню та газо-

водневої суміші. Тому важливим постає питання апробації використання та технології транспортування газу-водневої суміші наявними потужностями ГТС України.

Мета статті полягає у встановленні можливості застосування методики розрахунку режимів роботи компресорної станції для транспортування природного газу для процесу транспортування газу-водневої суміші різної концентрації магістральним газопроводом та проведення аналізу щодо можливості використання існуючих ГПА в процесі транспортування магістральним газопроводом сумішей природного газу з воднем із вмістом останнього від 0 до 20 %, що дасть можливість:

- дослідити вплив концентрації водню на фізичні та енергетичні показники природного газу та на параметри режимів роботи нагнітача ГПА компресорної станції в процесі транспортування газу-водневої суміші магістральним газопроводом;

- визначити необхідні технологічні параметри та технічні зміни в обладнанні ГПА для забезпечення транспорту магістральним трубопроводом відповідного спектру концентрації газу-водневих сумішей заданих обсягів в одиницях об'єму або в одиницях енергії;

- оптимізувати матеріальні та грошові затрати на транспортування газу-водневих сумішей.

Постановка завдання на дослідження

Завдання полягало в проведенні розрахунків режимів роботи ГПА двома незалежними методами, а саме:

- методом із використанням математичної моделі, яка побудована на основі зведених характеристик нагнітача [7-9];

- методом балансу енергії для одиниці маси природного газу в процесі його стиснення в решітці відцентрового нагнітача [10].

Заплановано визначити параметри режиму роботи ГПА, показник ентропії робочого процесу стиснення природного газу, ефективну, адіабатну та політропну роботи, індикаторний коефіцієнт корисної дії нагнітача та ефективну потужність його приводу. За вихідні дані прийнято:

- тип, зведені характеристики та основні рівняння математичної моделі нагнітача;

- компонентний склад газу-водневої суміші;

- обсяг перекачування газу-водневої суміші (продуктивність компресорної станції) в одиницях об'єму та енергії;

- параметри всмоктування (тиск та температура) газу-водневої суміші вхіді в нагнітач ГПА.

За базовий варіант взято природний газ без водню, що наближено відповідає компонентному

складу природного газу, яким користуються споживачі України на даний момент часу. Доля водню збільшувалася від 0 до 20 %, а метану відповідно зменшувалася від 92,6 % до 72,6 %.

Результати досліджень

Дослідження впливу концентрації водню на фізико-хімічні та енергетичні показники газозводневої суміші проводилось на основі її компонентного складу, представленого в табл. 1. Доля компонентів етану, пропану, бутану, азоту та вуглекислого газу залишалися незмінною.

Фізико-хімічні та енергетичні показники газозводневої суміші визначалися на основі методології, викладеної в ДСТУ ISO 6976:2009 [11]. Результати розрахунку основних фізико-хімічних

них та енергетичних показників газозводневої суміші приведені в табл. 2 та табл. 3.

Із представлених в табл. 2 результатів видно, що зі збільшенням концентрації водню в газозводневій суміші практично всі фізичні енергетичні показники зменшуються, крім ізобарної та ізохорної теплоємності, показника адиабати та газової сталої. Зменшується також енергетична цінність кубічного метра газозводневої суміші у порівнянні з базовим варіантом.

При концентрації 20 % водню в одному кубічному метрі газозводневої суміші, вища теплота згоряння зменшується на 13 %, хоча число Воббе, практично не змінюється. Це дає можливість стверджувати, що газозводнева суміш є заміником природного газу [6].

Таблиця 1

Компонентний склад газозводневої суміші

№ з/п	Доля компоненту газозводневої суміші, %						
	Водень, H ₂	Метан, CH ₄	Етан, C ₂ H ₆	Пропан, C ₃ H ₈	Бутан, C ₄ H ₁₀	Азот, N ₂	Діоксид вуглецю, CO ₂
1	0	92,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
2	2	90,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
3	4	88,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
4	6	86,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
5	8	84,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
6	10	82,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
7	12	80,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
8	14	78,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
9	16	76,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
10	18	74,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1
11	20	72,6	3	1,3	0,7	1,3	1,1

Таблиця 2

Фізичні показники газозводневої суміші

№ з/п	Концентрація водню H ₂ , %	Молекулярна маса μ , моль/м ³	Густина нормальна, * ρ_n , кг/м ³	Густина стандартна, ** ρ_c , кг/м ³	Відносна густина Δ	Газова стала R, Дж/кгК	Показник адиабати κ
1	0	17,586	0,785	0,732	0,607	501,6	1,302
2	2	17,306	0,773	0,720	0,598	573,7	1,312
3	4	17,025	0,760	0,708	0,588	645,8	1,321
4	6	16,745	0,748	0,697	0,578	718,0	1,328
5	8	16,464	0,735	0,685	0,569	790,1	1,335
6	10	16,184	0,722	0,673	0,559	862,2	1,340
7	12	15,903	0,710	0,662	0,549	934,3	1,345
8	14	15,623	0,697	0,650	0,540	1006,4	1,349
9	16	15,342	0,685	0,638	0,530	1078,6	1,353
10	18	15,061	0,672	0,627	0,520	1150,7	1,356
11	20	14,781	0,660	0,615	0,510	1222,8	1,359

*Густина газозводневої суміші при $P = 1,01325$ бар, $T = 373,15$ К

**Густина газозводневої суміші при $P = 1,01325$ бар, $T = 393,15$ К

На рис. 1 представлено залежності відносних до базового варіанту фізичних та енергетичних величин газозводневої суміші від концентрації водню, а саме густини за стандартних умов, відносної густини, газової сталої показника адиабати та вищої теплоти згоряння.

Таблиця 3

Енергетичні показники газо-водневої суміші

№ з/п	Концентрація водню H_2 , %	Ізобарна теплоємність, c_p , Дж/кгК	Ізохорна теплоємність, c_{23} , Дж/кгК	Вища теплота згоряння H_s , кВт/м ³	Нища теплота згоряння H_i , кВт/м ³	Число Воббе W , кВт/м ³
1	0	2164,56	1662,98	10,715	9,675	13,753
2	2	2411,16	1837,46	10,574	9,545	13,674
3	4	2657,76	2011,93	10,433	9,414	13,606
4	6	2904,36	2186,41	10,292	9,284	13,537
5	8	3150,96	2360,88	10,152	9,153	13,458
6	10	3397,56	2535,36	10,011	9,023	13,390
7	12	3644,16	2709,84	9,870	8,892	13,321
8	14	3890,76	2884,31	9,729	8,762	13,239
9	16	4137,36	3058,79	9,588	8,631	13,170
10	18	4383,96	3233,26	9,448	8,500	13,102
11	20	4630,56	3407,74	9,307	8,370	13,032

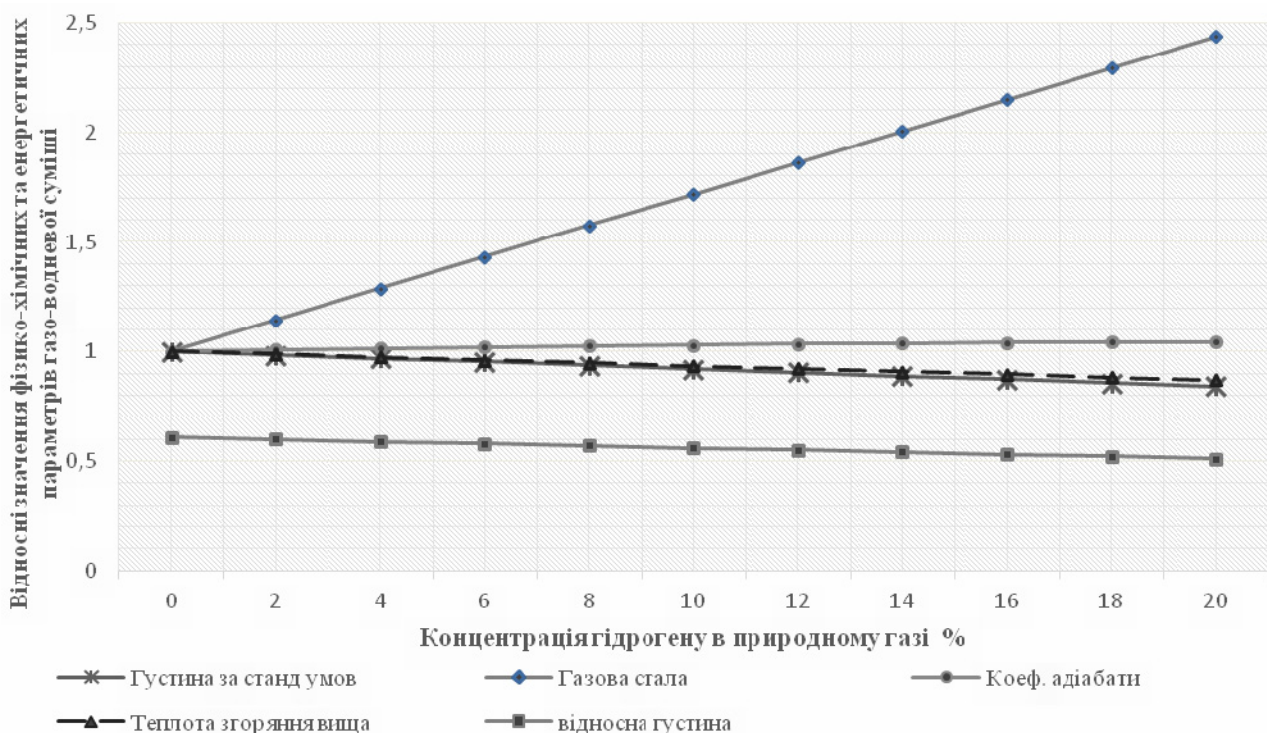


Рис. 1. Залежність відносних фізико-хімічних та енергетичних параметрів газо-водневої суміші від концентрації водню

Алгоритм розрахунку параметрів режимів роботи нагнітача

Розрахунок режимів роботи ГПА компресорної станції для різної концентрації водню газо-водневої суміші проведено за двома незалежними методиками, що дозволило оцінити достовірність отриманих результатів та зробити відповідні висновки щодо можливості використання наявного обладнання компресорної станції для транспорту газо-водневої суміші магістральним газопроводом.

Перша методика розрахунку режиму роботи ГПА компресорної станції для різної концент-

рації водню газо-водневої суміші (газу) передбачала використання математичної моделі нагнітача, яка побудована за зведеними характеристиками залежності степені стиснення ϵ , ефективної зведеної потужності приведеної до густини газу $N(\rho)_{зв}$, індикаторного (політропного) коефіцієнта корисної дії η_i від зведеної за умов всмоктування витрати газу $Q_{зв}$ нагнітача для відповідного числа зведеної частоти обертання робочого колеса по відношенню до номінальної частоти обертання $(n/n_n)_{зв}$ [12–14].

За основу розрахунків покладено чотиричленні рівняння, що описують криві залежності

зведеної характеристики для відповідного типу нагнітача.

$$\varepsilon = A_0 + A_1 Q_{зв} + A_2 Q_{зв}^2 + A_3 Q_{зв}^3 \quad (1)$$

для $(n/n_n)_{зв} = 1$;

$$\eta_i = K_0 + K_1 Q_{зв} + K_2 Q_{зв}^2 + K_3 Q_{зв}^3; \quad (2)$$

$$(N/\rho)_{зв} = M_0 + M_1 Q_{зв} + M_2 Q_{зв}^2 + M_3 Q_{зв}^3, \quad (3)$$

де $A_0 \dots A_3, K_0 \dots K_3, M_0 \dots M_3$ – коефіцієнти, які є індивідуальними для відповідного типу нагнітача.

При заданих параметрах газо-водної суміші на вході в нагнітач параметри всмоктування, а саме тиск $P_{вх}$ та температура $T_{вх}$ при заданій зведеній витраті компресорної станції $Q_{зв}$ визначались необхідна кількість робочих нагнітачів газоперекачувальних агрегатів (ГПА), степінь стиснення ε , тиск P_n , температура T_n на виході із нагнітача, частота обертання його ротора n , індикаторний коефіцієнт корисної дії η_{i_n} , потужність на з'єднувальній муфті приводу та ротора нагнітача N_d [12–14].

Друга методика розрахунку базується на залежності температури газо-водневої суміші від ентропії для фіксованого значення тиску [10]:

$$T = f(S)_{P=const} \quad (4)$$

У відповідності до залежності (4) для фіксованих значень тиску та температури газо-водневої суміші на вході $P_{вх}, T_{вх}$ та на виході із нагнітача P_n, T_n за балансом енергії для одиниці маси природного газу в процесі його стиснення в решітці відцентрового нагнітача визначались ефективна L_e , адіабатна $L_{ад}$, політропна $L_{п}$ роботи, ефективна потужність ГПА N_e , показник політропи n , індикаторний (політропний) коефіцієнт корисної дії нагнітача η_i та порівнювались отримані результати з результатами розрахунку відповідних параметрів за першою методикою.

Апробація методики

Для апробації методики розрахунку розглянуто газоперекачувальний агрегат ГПА10-01 із приводом ДР 59Л та повнонапірним двоступеневим нагнітачем 235-21-2. Коефіцієнти рівнянь (1...3) для даного нагнітача приведені в табл. 4. Таблиця 4

Коефіцієнти чотиричленних рівнянь нагнітача 235-21-2

A_0	A_1	A_2	A_3
2,227	$-9,196 \cdot 10^{-3}$	$4,141 \cdot 10^{-5}$	$-7,095 \cdot 10^{-8}$
K_0	K_1	K_2	K_3
$7,043 \cdot 10^{-1}$	$-1,863 \cdot 10^{-3}$	$2,569 \cdot 10^{-5}$	$6,490 \cdot 10^{-8}$
M_0	M_1	M_2	M_3
229,796	-1,737	0,013	$2,426 \cdot 10^{-5}$

Визначена оптимальна зведена продуктивність $Q_{зв,opt} = 219,848 \text{ м}^3/\text{хв}$ за умов всмоктування при мінімальній $Q_{зв,min} = 180,0 \text{ м}^3/\text{хв}$ та максимальній продуктивності $Q_{зв,max} = 310,0 \text{ м}^3/\text{хв}$ нагнітача, номінальна частота обертання ротора нагнітача $n_n = 3700 \text{ об/хв}$ та зведені параметри $T_{зв} = 288 \text{ К}, z_{зв} = 0,9, R_{зв} = 451 \text{ Дж/кгК}$. Абсолютний тиск та температура на вході в нагнітач $P_{вх} = 55,213 \text{ бар}, T_{вх} = 291,15 \text{ К}$.

Встановлено, що при продуктивності компресорної станції $Q = 96,7 \text{ млн м}^3/\text{доб}$ за стандартних умов при роботі чотирьох ГПА продуктивність одного за стандартних умов становить $Q_{гпа} = 1007,29 \text{ тис м}^3/\text{год}$, а при роботі трьох ГПА – $Q_{гпа} = 1343,056 \text{ тис м}^3/\text{год}$ відповідно.

Розрахунки проведено з використанням даних про фізико-хімічні та енергетичні показники газо-водневої суміші, що приведені в табл. 1 та 2.

В процесі розрахунків витримувалися наступні умови:

- тиск на виході з нагнітача для кожного значення концентрації водню залишався сталою величиною, а саме: $P_n = 71,67 \text{ бар}$;

- степінь стиснення газо-водневої суміші $\varepsilon = 1,298$.

Продуктивність компресорної станції за базовим варіантом задавалася, виходячи із умови максимально можливої потужності приводу нагнітача для забезпечення заданого обсягу перекачування природного газу.

При зміні концентрації водню в газо-водневій суміші об'ємна продуктивність компресорної станції за стандартних умов залишалася незмінною.

Решта розрахунків відповідно до першої методики розрахунку режимів роботи компресорної станції приведені в табл. 5.

При проведенні розрахунку ефективної L_e , адіабатної $L_{ад}$, політропної $L_{п}$ роботи на один кілограм газо-водневої суміші, ефективної потужності ГПА N_e , показника політропи n , індикаторного (політропного) коефіцієнта корисної дії нагнітача ГПА η_i з використання другої методики приймалось за основу значення тиску і температури на вході та виході із нагнітача з попереднього розрахунку, далі за методикою [7-9] визначали необхідні значення параметрів.

Результати розрахунку даних величин для різних значень концентрації водню газо-водневої суміші приведені в табл. 6.

Таблиця 5

Параметри режимів роботи нагнітача ГПА у відповідності до першої методики

№ з/п	Концентрація водню H_2 , %	Кількість ГПА	Зведена продуктивність ГПА $m^3/xв$	Продуктивність КС, МВт/год	Продуктивність ГПА МВт/год	Температура на виході з нагнітача T_n , К	Частота обертання ротора n , об/хв	Потужність приводу ГПА N_d , кВт/год
1	0	4	257,553	43,172	10,793	313,538	3553,608	10008,807
2	2	4	241,144	42,605	10,651	313,607	3698,132	10823,063
3	4	4	227,583	42,037	10,509	313,889	3855,459	11707,575
4	6	4	216,135	41,47	10,367	314,274	4018,547	12640,640
5	8	4	206,304	40,903	10,226	314,697	4182,317	13595,235
6	10	3	263,269	40,335	13,445	316,093	4747,717	21170,716
7	12	3	253,605	39,768	13,257	315,835	4850,535	21951,718
8	14	3	244,662	39,201	13,067	315,741	4962,858	22783,177
9	16	3	236,641	38,633	12,877	315,737	5080,724	23637,944
10	18	3	229,394	38,066	12,689	315,807	5203,195	24519,593
11	20	3	222,805	37,499	12,500	315,919	5328,032	25407,740

Таблиця 6

Результати розрахунку параметрів термодинамічного процесу

№ з/п.	Концентрація водню H_2 , %	Ефективна робота ГПА L_b , Н*м/кг	Адіабатна робота ГПА L_b , Н*м/кг	Політропна робота ГПА L_b , Н*м/кг	Ефективна потужність приводу ГПА N_e , кВт/год	Показник політропи	Індикаторний ККД
1	0	48482,5	39284,1	39561,8	9923,786	1,396	0,816
2	2	54171,2	44977,1	45262,1	10911,312	1,398	0,836
3	4	60463,5	50656,8	50967,3	11981,288	1,405	0,843
4	6	67193,0	56348,6	56697,9	13095,390	1,414	0,844
5	8	74231,9	62037,0	62435,3	14224,841	1,424	0,841
6	10	84793,7	67733,5	68297,5	21295,840	1,460	0,805
7	12	90007,5	73418,1	73972,1	22213,434	1,453	0,822
8	14	95730,0	79123,6	79683,3	23208,952	1,451	0,832
9	16	101782,6	84800,5	85377,1	24233,214	1,451	0,839
10	18	108153,7	90502,2	91105,7	25279,244	1,452	0,842
11	20	114756,0	96200,2	96838,6	26322,825	1,455	0,844

Визначено, що при збільшенні концентрації водню в газо-водневій суміші в порівнянні з базовим варіантом без домішування водню (строчка 1), частота обертання ротора нагнітача збільшується із величини 3553,608 об/хв при базовому варіанті до 5328,032 об/хв, що значно перевищує їх номінальні величини. Це можна пояснити тим, що при збільшенні концентрації водню густина газо-водневої суміші (див. табл. 2) і маса перекачування зменшуються.

При зменшенні маси перекачувальної суміші частота обертання ротора нагнітача збільшується, що призводить до зменшення зведеної продуктивності нагнітача з $Q_{зв} = 257,553 m^3/c$ до $206,304 m^3/c$ при концентрації водню – 8 %. Режим роботи нагнітача при цьому приближається до зони помпажу $Q_{зв,ном} = 1,1$; $Q_{зв,мін} = 198 m^3/c$.

З метою уникнення аварійної ситуації для забезпечення заданої продуктивності необхідно зменшити кількість нагнітачів з чотирьох до

трьох. Зведена продуктивність за умов всмоктування при концентрації водню 10 % при цьому збільшується і становить величину $263,269 m^3/c$.

При подальшому збільшенні концентрації водню зведена продуктивність зменшується і наближається до критичної (зона помпажу). Внаслідок цього потужність приводу нагнітача збільшується з $N_d = 10008,81$ кВт при базовому варіанті до $25407,74$ кВт при концентрації водню в газо-водневій суміші 20 %, що практично співпадає з ефективною потужністю, розрахованою за другою методикою, а саме $N_e = 9923,786$ кВт при базовому варіанті до $26322,825$ кВт. Така ж тенденція простежується для ефективної, адіабатної та політропної роботи. Показник політропи із зростанням концентрації водню збільшується від $n = 1,396$ до $1,455$.

Отже, зміна концентрації водню призводить до зростання сил теплового опору. Величина індикаторного ККД, як за першою, так і за другою методиками ідентична.

Слід відмітити, що збільшення концентрації водню в газо-водневій суміші призводить до зменшення продуктивності компресорної станції в одиницях енергії від $E_{\text{кв}} = 43,172$ мВт/год до 37,499 мВт/год, що складає 13,1 % від базового варіанту.

На рис. 2 представлено залежності віднесених до базового варіанту параметрів режиму роботи ГПА від концентрації водню в газо-водневій суміші, а саме: потужності приводу та ефективної потужності, частоти обертання ротора нагнітача, ефективної, адиабатної роботи, продуктивності компресорної станції в одиницях енергії.

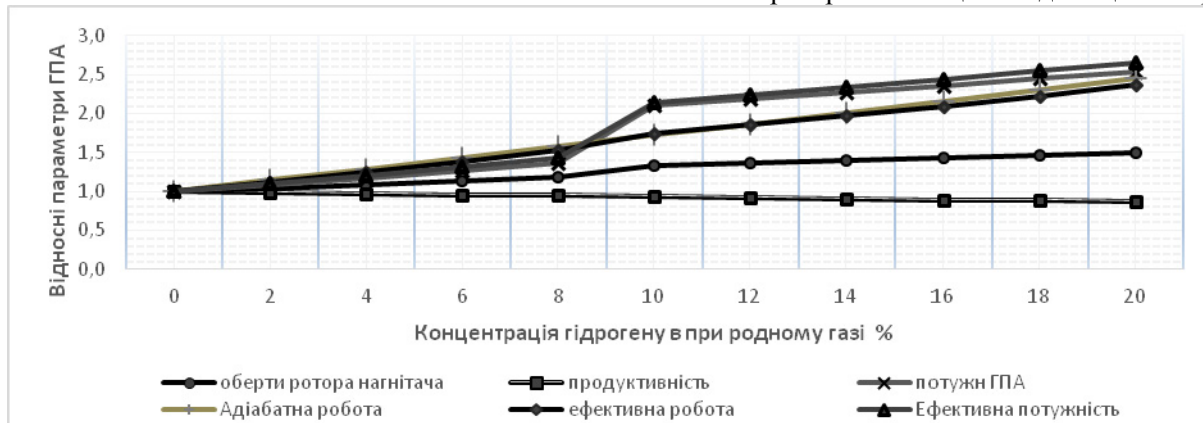


Рис. 2. Залежність відносних параметрів режиму роботи ГПА від концентрації водню в природному газі

Висновки

Проведено розрахунки режимів роботи ГПА компресорної станції для різної концентрації водню в газо-водневій суміші за двома незалежними методиками, що дозволило оцінити достовірність отриманих результатів та зробити відповідні висновки щодо можливості використання наявного обладнання компресорної станції для транспорту газо-водневої суміші магістральним газопроводом, а саме:

1. Збільшення концентрації водню в газо-водневій суміші призводить до зменшення її енергетичної цінності. Проте, за рахунок зменшення відносної по повітрю густини суміші число Воббе практично не змінюється, тому газо-воднева суміш може бути заміником природного газу [15].

2. Збільшення концентрації водню в газо-водневій суміші при її транспортуванні магістральним трубопроводом призводить до збільшення частоти обертання ротора нагнітача, що призводить до необхідності збільшення потужності приводу ГПА компресорної станції. Отже, є необхідним проведення реконструкції компресорної станції, а саме заміна приводу з більшою потужністю або зміни конструкції проточної частини нагнітача.

3. Використання наявної інфраструктури ГТС України з метою транспортування газо-водневої суміші можливо при концентраціях водню до 4 %.

Перспективи подальших досліджень

Планується дослідження зміни геометрії решітки ротора нагнітача (проточної частини) з метою можливого застосування наявного приводу ГПА, а також дослідження режимів сумісної

роботи компресорної станції та ділянки магістрального газопроводу в процесі транспортування газо-водневої суміші з різною концентрацією водню.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] EU Hydrogen Strategy. URL: <https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS201296> (access date 25.01.2023)
- [2] Звіт Міжнародної енергетичної асоціації за 2019 р. Майбутнє водню. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (access date 18.12.2022)
- [3] Шевченко В. Г., Ляшенко В. І., Осадча Н. В. Світові тенденції розвитку водневої енергетики. *Вісник економічної науки України*. 2021. № 2 (41). С. 17–26. [https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2\(41\).17-26](https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.2(41).17-26)
- [4] Кудря С. О., Репкін О. О., Рубаненко О. О. та ін. Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України. *Відновлювана енергетика*. 2022, № 1(68). С. 5-16. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\).5-16](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).5-16)
- [5] Середюк М. Д. Газодинамічні режими експлуатації газових мереж низького тиску при транспортуванні газо-водневих сумішей. *International Scientific Journal "Internauka"*. 2022, С. 23. <https://doi.org/10.25313/2520-2057-2021-1>
- [6] Транспортування водню та потенціал оператора ГТС України. 2022, С.25. URL: <https://tsoua.com/wp-content/uploads/2021/10/Hydrogen-Consultation-paper-v2.pdf>
- [7] Компресорні станції магістральних газопроводів: методичні рекомендації до виконання курсового проекту / уклад.: М. П. Андріішин, К. І. Капітанчук, В. В. Козлов. К. : НАУ. 2018. 60 с. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39833>

- [8] Андрійшин М. П., Капітанчук К. І. Особливості гідравлічного розрахунку руху природного газу в газопроводі при малих значеннях тиску. XXI Міжнар. наук.-тех. конф. АС «Промислова гідравліка і пневматика» (30 листопада 2020 року, м. Київ). 2020. С. 86–87. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/44735>
- [9] Кулик М. С., Капітанчук К. І., Андрійшин М. П. Нагнітачі природного газу: підручник. К.: НАУ, 2022. 228 с. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/55906>
- [10] Andriyishyn M. P., Kapitanchuk K. I., Pikul M. O., Otroshchenko V. V. A study of the energy balance of main gas pipeline operating modes on its efficiency. Engines and Power Installations: Safety in Aviation And Space Technologies: The Seventh World Congress. «Aviation in the XXI-st Century» (September 28–30, 2022, Kyiv) 2022. v. 1. P. 1.4.21–1.4.26. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/56621>
- [11] ДСТУ ISO 6976:2009. Природний газ. Визначення теплоти згорання, густини, відносної густини і числа Воббе на основі компонентного складу (ISO 6976:1995/Cor. 2:1997, Cor. 3:1999, IDT). К. : Держспожив-стандарт України. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=26775
- [12] Андрійшин М. П., Капітанчук К. І., Андрійшин Н. М. Визначення ефективності роботи газоперекачувального агрегату компресорної станції за даними її експлуатації. Наукоємні технології. 2021. №1 (49). С. 49–56. DOI:10.18372/2310-5461.39.13097
- [13] Андрійшин М. П., Капітанчук К. І., Чернищенко О. М. Основні чинники впливу на енергетичну ефективність використання природного газу. Наукоємні технології. 2019, № 1(41). С. 51–58. DOI: 10.18372/2310-5461.41.13529
- [14] Andriyishyn M. P., Kapitanchuk K. I., Andriyishyn N. M. Energy efficient usage of natural gas criterias. Engines and Power Installations: The Fourteenth International Scientific Conference «AVIA–2019» (April 23–25, 2019, Kyiv). P. 20.7–20.11. URL: <https://er.nau.edu.ua/handle/NAU/39798>
- [15] ДСТУ EN 437:2014. Випробувальні гази. Випробувальний тиск. Категорії приладів (EN 437: 2012, IDT, EN 437: 2012, IDT). К. : Держстандарт України. 2016. С. 52. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=80511

**Андрійшин М. П., Капітанчук К. І., Андрійшин Н. М.
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ГАЗО-ВОДНЕВОЇ СУМІШІ НА ГАЗОТЕРМОДИНАМІЧНІ
ПАРАМЕТРИ РОБОТИ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМПРЕСОРНОЇ
СТАНЦІЇ**

Розглянуто можливості реалізації вимог водневої стратегії ЄС (EU Hydrogen Strategy), яка передбачає широке використання водню як енергоносія для тих галузей, які не можна електрифікувати, і має за мету довести викиди вуглекислого газу промисловими об'єктами до нуля. Важливим елементом стратегії є розвиток проектів водневої енергетики в рамках підготовки до програми H₂Ready, тобто впровадження комплексного підходу щодо можливості транспортування в газотранспортних та газопровідних мережах сумішей природного газу з воднем із вмістом останнього до 20%. Проведено розрахунки режимів роботи ГПА компресорної станції для різної концентрації водню газо-водневої суміші за двома незалежними методиками, що дозволило оцінити достовірність отриманих результатів та зробити відповідні висновки щодо можливості використання наявного обладнання компресорної станції для транспорту газо-водневої суміші магістральним газопроводом. Доведено, що збільшення концентрації водню в газо-водневій суміші призводить до зменшення її енергетичної цінності, але за рахунок зменшення відносної по повітрю густини суміші число Воббе практично не змінюється, тому газо-воднева суміш може бути заміником природного газу.

Показано, що збільшення концентрації водню в газо-водневій суміші при її транспортуванні магістральним трубопроводом призводить до збільшення частоти обертання ротора нагнітача, що призводить до необхідності збільшення потужності приводу ГПА компресорної станції. Отже, є необхідним проведення реконструкції компресорної станції, а саме заміна приводу з більшою потужністю або зміни конструкції проточної частини нагнітача. Зроблено висновок, що використання наявної інфраструктури ГТС України для транспортування газо-водневої суміші можливо при концентраціях водню до 4%.

Ключові слова: водень, природний газ, газотранспортна система, газоперекачувальний агрегат.

**Andriyishyn M., Kapitanchuk K., Andriyishyn N.
A STUDY OF THE INFLUENCE OF THE GAS-HYDROGEN MIXTURE ON THE
GAS-THERMODYNAMIC PARAMETERS OF THE GAS PUMPING UNIT
OF THE COMPRESSOR STATION**

The possibilities of implementing the requirements of the EU hydrogen strategy (EU Hydrogen Strategy), which provides for the wide use of hydrogen as an energy carrier for those industries that cannot be electrified, and aims to reduce carbon dioxide emissions by industrial facilities to zero, are considered. An important element of the strategy is

the development of hydrogen energy projects in preparation for the H2Ready program, i.e., the implementation of a comprehensive approach to the possibility of transporting mixtures of natural gas with hydrogen up to 20% in gas transportation and gas pipeline networks. Calculations of the operation modes of the compressor station's HPA for different hydrogen concentrations of the gas-hydrogen mixture were carried out using two independent methods, which made it possible to assess the reliability of the obtained results and draw appropriate conclusions about the possibility of using the available equipment of the compressor station for the transport of the gas-hydrogen mixture through the main gas pipeline. It has been proven that an increase in the concentration of hydrogen in a gas-hydrogen mixture leads to a decrease in its energy value, but due to a decrease in the density of the mixture relative to air, the Wobbe number practically does not change, so the gas-hydrogen mixture can be a substitute for natural gas.

It is shown that an increase in the concentration of hydrogen in the gas-hydrogen mixture during its transportation through the main pipeline leads to an increase in the rotation frequency of the supercharger rotor, which leads to the need to increase the power of the HPA drive of the compressor station. Therefore, it is necessary to carry out the reconstruction of the compressor station, namely, the replacement of the drive with greater power or the design change of the flow part of the supercharger. It was concluded that the use of the existing infrastructure of Ukraine's GTS for the transportation of a gas-hydrogen mixture is possible with hydrogen concentrations up to 4%.

Keywords: hydrogen, natural gas, gas transport system, gas pumping unit.

Стаття надійшла до редакції 02.02.2023 р.
Прийнято до друку 22.03.2023 р.