
Нові рішення у сучасній техніці та технологіях

УДК 662.6.9

DOI: 10.31471/1993-9868-2021-2(36)-98-105

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ У СУМІШАХ ІЗ СТИСНЕНИМ ПРИРОДНИМ ГАЗОМ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДВИГУНАХ

В. М. Мельник, Ф. В. Козак, М. М. Гнип, Д. В. Лісафін

*ІФНТУНГ; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 72-71-48;
e-mail: v a s j a m e l @ u k r . n e t*

Одним із важливих аспектів застосування водню в еквівалентному паливі є економічна ефективність. У розрахунках економічної ефективності використання водню як добавки до стисненого природного газу, необхідною технічною умовою взято забезпечення однакової теплотворної здатності еквівалентного палива у порівнянні з товарним природним газом. Для вирішення поставленого завдання нами отримано залежність зміни ціни природного газу від нижчої теплоти згорання, розраховано зміну витрати еквівалентного палива з рівняння балансу теплоти, яка міститься в стисненому природному газі та еквівалентному паливі. Залежно від приросту нижчої теплоти згорання при додаванні водню нами отримано значення теплоти згорання стисненого газу, який можна використати у сумішах з воднем. Отже, для прийнятих цін на стиснений природний газ і водень та за умови однакової теплотворної здатності еквівалентного палива і стисненого природного газу з проведених розрахунків видно, що із збільшенням процентного масового вмісту водню в паливних сумішах природного газу і водню досягається збільшення економічної ефективності. Це відбувається за рахунок використання в паливних сумішах природного газу з низькою теплотворною здатністю, а отже, і низької вартості. Як варіант це може бути біогаз. При застосуванні добавок водню до стисненого природного газу з низькою теплотворною здатністю в кількості до 70% масових часток можна досягнути зниження вартості природного газу до 12,5 грн. на кілограм. Такий ефект від використання добавок водню до природного газу вказує на перспективність даного напрямку використання водню та доцільність подальших досліджень.

Ключові слова: двигун, альтернативні палива, водень, стиснений природний газ, економічна ефективність, паливні суміші, теплота згорання, вартість.

Одним из важных аспектов применения водорода в составе эквивалентного топлива является экономическая эффективность. При расчете экономической эффективности использования водорода в качестве добавок к сжатому природному газу, необходимым техническим условием является обеспечения одинаковой теплотворной способности эквивалентного топлива по сравнению с товарным природным газом. Для решения поставленной задачи нами получена зависимость изменения цены природного газа от низшей теплоты сгорания, рассчитано изменение расхода эквивалентного топлива по уравнению баланса теплоты, содержащейся в сжатом природном газе и эквивалентном топливе. В зависимости от прироста низшей теплоты сгорания при добавлении водорода нами получено значение теплоты сгорания сжатого газа, который можно использовать в смесях с водородом. Итак, для принятых цен на сжатый природный газ и водород при условии одинаковой теплотворной способности эквивалентного топлива и сжатого природного газа из проведенных расчетов видно, что с увеличением процентного массового содержания водорода в топливных смесях природного газа и водорода достигается увеличение экономической эффективности.

Это возможно за счет использования в топливных смесях природного газа с низкой теплотворной способностью и, следовательно, низкой стоимости. Как вариант такого топлива может использоваться биогаз. При применении добавок водорода к сжатому природному газу с низкой теплотворной способностью в количестве до 70% массовых частей можно достичь снижения стоимости природного газа до 12,5 грн. на килограмм. Такой эффект при использовании добавок водорода к природному газу указывает на перспективность данного направления использования водорода и целесообразности дальнейших исследований.

Ключевые слова: двигатель, альтернативные топлива, водород, сжатый природный газ, экономическая эффективность, топливные смеси, теплота сгорания, стоимость.

One of the important aspects of using hydrogen in an equivalent fuel is economic efficiency. In the calculations of the economic efficiency of the use of hydrogen as an additive to compressed natural gas, the necessary technical condition is to ensure the same calorific value of the equivalent fuel in comparison with commercial natural gas. To solve this problem, we obtained the dependence of the change in the price of natural gas on the lower heat of combustion, calculated the change in the consumption of equivalent fuel from the equation of heat balance contained in compressed natural gas and equivalent fuel. Depending on the increase in the lower heat of combustion when adding hydrogen, we obtained the value of the heat of combustion of compressed gas that can be used in mixtures with hydrogen. Therefore, for the accepted prices for compressed natural gas and hydrogen and under the same calorific value of equivalent fuel and compressed natural gas from the calculations it is seen that with increasing percentage of hydrogen in fuel mixtures of natural gas and hydrogen increases economic efficiency. This is due to the use in fuel mixtures of natural gas with low calorific value, and hence low cost, and as an option it can be biogas. When using hydrogen additives to compressed natural gas with low calorific value in the amount of up to 70% by weight, you can achieve a reduction in the cost of natural gas to 12.5 UAH on kilogram. This effect, when using hydrogen additives to natural gas, indicates the prospects of this direction of hydrogen use and the feasibility of further research.

Key words: engine, alternative fuels, hydrogen, compressed natural gas, economic efficiency, fuel mixtures, heat of combustion, cost.

Вступ

Використання альтернативних видів моторного палива на основі водню набуває поширення в Україні та світі. Це пояснюється зростанням ціни на вуглеводневе паливо та посиленням екологічних вимог до них і відпрацьованих газів двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) шляхом введення норм Євро-6.

Нині у світовій енергетиці значну увагу привертає проблема виробництва та використання «зеленого» водню, що виробляється електролізом. І хоча економічно виправданих технологій виробництва та використання водню поки що не існує, в Україні існує потенціал його виробництва на електроенергії АЕС, а також можливість транспортування газопаливних сумішей до країн ЄС.

Важливим аспектом застосування водню в сумішах зі стисненим природним газом (СПГ) в еквівалентному за теплотворною здатністю паливі є його економічна ефективність.

Аналіз літературних джерел

На сьогодні не існує жодної економічно-обґрунтованої технології використання водню, що пояснюється високою вартістю його виробництва (табл. 1). Та оскільки за теплофізичними властивостями він має вищі показники, ніж СПГ, внаслідок скорочення транзиту російського газу в Україну розглядається питання щодо можливості транспортування ГТС сумі-

шей водню з СПГ. Одночасно досліджується питання виробництва водню з відновлювальних джерел та за рахунок атомної енергії.

Нині фахівці розрізняють так звані "зелений", "сірий", "синій" або "фіолетовий" водень. Кольорова позначка змінюється залежно від способу отримання водневої сировини та джерела енергії для цього. "Блакитний" водень, наприклад, синтезується з природного газу, "сірий" - за допомогою електроенергії, виробленої з вугільного палива (зокрема природного газу або вугілля), "фіолетовий" - із застосуванням ядерної енергії. Тож тільки процес отримання "зеленого" водню, що базується на застосуванні відновлювальних джерел енергії, не призводить до викидів чи якогось іншого шкідливого впливу на довкілля [1].

Собівартість виробництва «сірого» водню оцінюється від 2 до 5 дол./кг H_2 , що становить у перерахунку 0,18-0,45 дол./ m^3 H_2 . Конверсією вуглеводнів, нафти та вугілля за різними оцінками отримують 95–99% водню, решту – від 0,1 до 5% – електролізом. Вартість виробництва конверсією у 2-5 разів менша, ніж електролізом. Так, витрата електричної енергії на виробництво 1 m^3 водню електролізом у середньому становить 5 кВтгод, а у найкращих сучасних електролізерах – 4 кВтгод, тобто енергетичний складник у собівартості електролізного водню становитиме 0,9-2,25 дол./ m^3 [1].

Таблиця 1 – Теплофізичні характеристики водню

Горючий газ	Нижча теплота згоряння, кДж/кг	Температура запалювання, °С	Межі запалювання із повітрям, % у суміші	Калориметрична температура горіння, °С	Швидкість розповсюдження полум'я, м/с
СПГ	51290	111	5-15	2211	0,28
Водень	120000	119	3,3-81,5	2380	1,6

Слід зазначити, що вартісне порівняння ефективності виробництва водню з іншими енергоносіями має умовний характер, оскільки цінова кон'юнктура різна у різних регіонах світу та країнах.

У роботі [2] ККД виробництва водню електролізом щодо первинного палива оцінюється у 23%. Енергетичний оглядач Ligh Collins з University of Birmingham інформує про нову ніби-то високоефективну технологію виробництва «зеленого» водню з використанням теплоти промислових підприємств, що знаходяться поблизу, яка дозволяє виробляти у 4-6 разів більше водню на 1 кВтгод витраченої енергії порівняно з наявними електролізерами. Перевірочні розрахунки за наведеними в інформації даними показали її помилковість.

Журнал Power Engineering International відзначає п'ять світових водневих проєктів, які, на думку авторів, здатні змінити загальний стан справ щодо водневої енергетики [3].

Проєкт HyDeploy green energy trial UK демонструє інжекцію 20% об. водню в існуючу газову розподільну мережу університету Keele, що постачає газ до 30 університетських та 100 житлових будинків. Суміш з 20% водню – найвища концентрація водню у суміші в Європі. Доведена безпека використання такої суміші у мережі. Проєкт фінансується регулятором ринку газу та електроенергії Великої Британії Ofgem у рамках конкурсу з питань інновацій у мережі і є результатом співпраці між Cadent Gas, Northern Gas Networks (NGN), Progressive Energy Ltd, Університетом Кіле (Keele University), Лабораторією охорони здоров'я та безпеки (Health & Safety Laboratory, скор. HSL) та компанією ITM Power. Cadent Gas та Northern Gas Networks є газорозподільними підприємствами – спонсорами проєкту. Деталі проєкту можна знайти у [4]. Подібний проєкт виконаний також компанією Engie у північній Франції [3].

Electrolysis facility in the Greater Copenhagen area – Denmark. Проєкт передбачає будівництво електролізної установки потужністю 2 МВт із сховищем водню. Енергія для електролізу постачатиметься від офшорних вітрових турбін, водень буде використовуватись як моторне паливо для міського транспорту [3].

SGH2 – City of Lancaster, California. Енергетична компанія SGH2 будує у Ланкастері (Каліфорнія) найбільшу в світі установку виробництва водню з продуктів газифікації паперових відходів. Сповідьється, що технологія здатна газифікувати для виробництва водню також пластик, покриття та текстиль. Стверджується, що у такий спосіб виробляється «більш зелений, ніж зелений» водень. За такої технології викиди вуглецю утричі менші, ніж під час електролізу, а водень виявляється у 5-7 разів дешевшим, ніж отриманий електролізом, і за вартістю виробництва конкурує із «сірим» воднем. Введення установки у промислову експлуатацію заплановано на 2023 р. [3].

Fukushima Hydrogen Energy Research Field, Japan – «Дослідницьке водневе поле» (FH2R) площею 180 тис. м² споруджується в окрузі Фукусіма з 2018 р. Використовується сонячний генератор потужністю 20 МВт разом з енергією від мережі для живлення найбільшої у світі водневої установки потужністю 10 МВт. Установка виробляє 1200 м³ водню на годину та має обладнання для зберігання та постачання водню [3].

H2-Hub Gladstone facility – Queensland, Australia. Проєкт відрізняється тим, що електролізер потужністю 175 кВт живиться від локальної мережі ВДЕ, суміш з природного газу, що містить 10% водню, постачається більш ніж 770 промисловим споживачам через наявну газову мережу. Це найбільший обсяг суміші з воднем, що постачається через наявну мережу [4].

Сучасний стан проблеми та напрями майбутнього використання водню розглядається науковцями у [5]. Одним з основних трендів світової енергетики є проблема водневої енергетики. Низкою країн на державному рівні прийнято програми переходу до водневої енергетики та водневої економіки. На виробництво електролітичного водню витрачається більше енергії, ніж її можна отримати під час його використання.

У праці Сороки Б.С. [6] пропонується збільшення вмісту водню у суміші із СПГ в межах 10-50%. При цьому зростає ККД у порівнянні з СПГ на 2–3%. Концентрація CO та NO_x у вихідному

дних газах при використанні сумішей суттєво зменшується.

Відомості про виробництво, властивості та використання водню, які зазвичай необхідні під час проектування водневих технологій, наведені у роботах [7, 8]. Однією з перспективних водневих технологій для України може бути виробництво водню за рахунок використання атомної енергії та енергії відновлювальних джерел та його експорт у складі сумішей із природним газом до європейських країн або використання як палива.

Для надійного впровадження такої технології потрібні довготривалі випробування придатності матеріалів газопроводів для транспортування сумішей, а тому у найближчій перспективі використання водню можливе всередині країни і як один із варіантів у складі сумішей з СПГ для двигунів внутрішнього згоряння.

Мета і завдання досліджень

У процесі використання водню на ДВЗ виникає ряд труднощів, що пов'язані з адаптацією двигуна та його систем.

Проте, перспектива використання водню у сумішах з СПГ має істотну економічну та екологічну доцільність, а тому є надзвичайно важливою.

Метою досліджень є оцінка доцільності використання водню в еквівалентному паливі (ЕП), з огляду на економічну ефективність.

До основних завдань досліджень відноситься розрахунок економічної ефективності додавання водню до СПГ, з огляду на комерційні витрати на пальне.

Отже, питання дослідження ефективності використання водню у сумішах з природним газом є актуальним, а результати допоможуть оцінити, шляхи зменшення потреби у стисненому природному газі.

Основні методи та методики дослідження

Дослідження економічної ефективності використання водню в сумішах з СПГ на двигунах внутрішнього згоряння здійснювалися кількома методами.

Серед цих методів найбільш ефективним є системний аналіз та метод зіставлення. Вони дозволяють проаналізувати з використанням об'єктивних критеріїв порівняльної оцінки енергетичних та економічних показників водню та СПГ, вплив енергетичної складової на собівартість утвореного еквівалентного за тепловою згоряння палива на його собівартість.

Одним із способів використання водню є спосіб змішування з стисненим природним га-

зом (СПГ) у певному об'ємному чи масовому співвідношенні з подальшою подачею цього еквівалентного палива (ЕП) в циліндри двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) [9].

З метою досягнення ефективного використання ЕП в ДВЗ необхідно з'ясувати економічну ефективність їх використання і порівняти її з економічними показниками чистого СПГ.

Розглянемо ефективність використання ЕП, з огляду на комерційну ефективність. На комерційну ефективність добавки водню до СПГ впливають фінансові витрати на паливо, оскільки інші витрати (на оливу, амортизаційні відрахування, ремонт, накладні видатки, витрати на шини тощо) під час роботи автомобілів на СПГ і на суміші СПГ з воднем будуть практично однаковими.

Доцільність використання добавок водню до бензину визначається за методикою [9, 10] якцо:

$$C_{СПГ} \geq (C_{СГ} \cdot q_{СГ} + C_{В} \cdot q_{В}) \cdot k, \quad (1)$$

де $C_{СПГ}$ – роздрібна ціна однієї тони СПГ, грн/т;

$C_{СГ}$ – роздрібна ціна однієї тони стисненого газу, що використовується в ЕП, грн/т;

$C_{В}$ – роздрібна ціна однієї тони водню, грн/т;

$q_{СГ}$ – масова частка стисненого газу в ЕП;

$q_{В}$ – масова частка водню в ЕП;

k – коефіцієнт, який враховує зміну витрати ЕП і визначається з рівняння балансу теплоти, яка міститься в СПГ та ЕП [2].

Нижчу теплоту згоряння ЕП знаходимо за формулою [9]:

$$h_{НЕП} = h_{НСГ} \cdot q_{СГ} + h_{НВ} \cdot q_{В}, \quad (2)$$

де $h_{НВ}$ – нижча теплота згоряння водню (відповідно до літературних даних складає $h_{НВ} = 120000$ кДж/кг);

$h_{НСГ}$ – нижча теплота згоряння стисненого газу, $h_{НСГ} = 51290$ кДж/кг.

З урахуванням формули (2) отримуємо:

$$k = \frac{h_{НСГ}}{h_{НСГ} \cdot q_{СГ} + h_{НВ} \cdot q_{В}}. \quad (3)$$

Залежність значення коефіцієнта k від масової частки водню в ЕП наведено у табл. 1. Максимальний вміст водню, з точки зору безпеки, становить до 50 % масових часток.

Для розрахунку комерційної ефективності необхідно мати залежність зміни ціни СПГ від його енергоємності. Виходячи з роздрібних цін СПГ на час проведення розрахунків, вартість однієї тони становила 13871 грн для стисненого газу з $h_{НСГ} = 51290$ кДж/кг, а врахувавши лінійний характер залежності отримуємо рис. 1.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнта k залежно від масової частки водню в ЕП

q_B	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
k	0,882	0,789	0,713	0,651	0,599

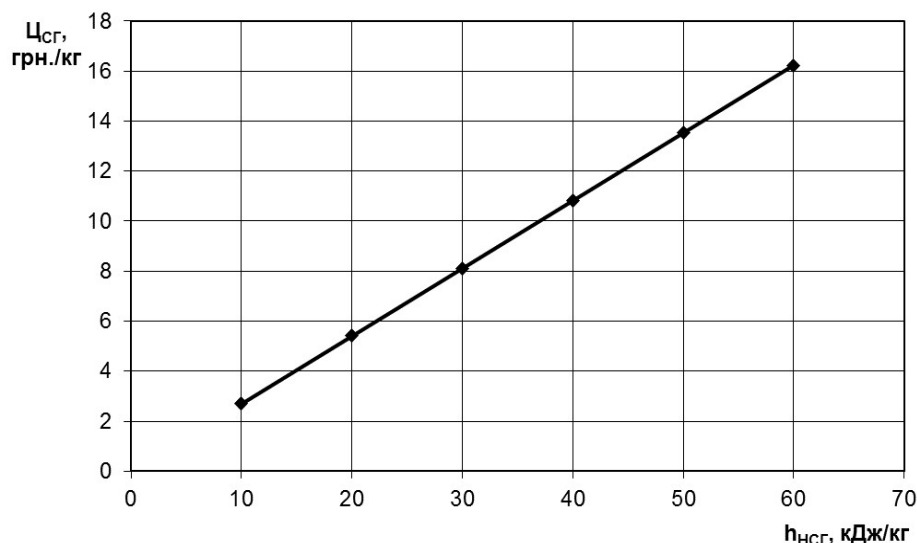


Рисунок 1 – Залежність зміни ціни СПГ від нижчої теплоти згоряння

Вартість СПГ залежно від енергоємності, використовуючи рис.1, можна описати рівнянням:

$$C_{СГ} = 0,2705 \cdot h_{НСГ} - 0,0004, \quad (4)$$

де $h_{НСГ}$ – нижча теплота згоряння ЕП. При цьому коефіцієнт кореляції даної залежності рівний $R^2=1,0$. Значення $h_{НСГ}$ природного газу, необхідного для змішування, розраховують за залежністю:

$$h_{НСГ} = h_{НСГ} - \Delta h_{НЕП}, \quad (5)$$

де $\Delta h_{НЕП}$ – приріст теплоти згоряння суміші СПГ і водню, який визначається за процентним вмістом водню в ЕП і визначається за залежністю (рис. 2).

Комерційна ефективність застосування ЕП оцінюється різницею цін СПГ і відповідної за теплою згоряння кількості ЕП та визначається за залежністю:

$$\Delta E_k = C_{СПГ} - (C_{СГ} \cdot q_{СГ} + C_B \cdot q_B) \cdot k. \quad (6)$$

В розрахунках прийнята вартість водню – 101,4 грн./кг (за даними [1]).

У розрахунку комерційної ефективності використання водню як добавки до СГ необхідною технічною умовою має бути забезпечення однакової нижчої теплоти згоряння ЕП у порівнянні СПГ. На рис. – 2 за результатами дослідження показано залежність зміни нижчої теплоти згоряння СГ від процентного масового вмісту в ньому водню.

Залежність (рис. 2) описується аналітичним рівнянням:

$$h_{НЕП} = 68,71 \cdot q_B + 51,29, \quad (7)$$

де $h_{НЕП}$ – нижча теплота згоряння ЕП, МДж/кг;

q_B – процентний масовий вміст водню в ЕП, % мас. Коефіцієнт кореляції для даного рівняння $R^2=1,0$.

Залежність приросту $\Delta h_{НЕП}$ СГ (визначеного з рис. 2) від процентного вмісту в ньому водню зображена на рис. 3.

Аналітично залежність описується рівнянням:

$$\Delta h_{НЕП} = 68,71 \cdot q_B. \quad (8)$$

Коефіцієнт кореляції $R^2=1$.

У зв'язку з тим, що із зменшенням нижчої теплоти згоряння СГ роздрібна ціна на нього знижується, то для досягнення комерційної ефективності ЕП спочатку з рівняння (8) визначаємо зміну $\Delta h_{НЕП}$ від процентного вмісту водню в ЕП, а далі з рівняння (7) – теплоту згоряння СГ, який доцільно використовувати в ЕП.

Із рівняння (4) можна одержати ціну СГ, що використовується в ЕП.

Для оцінки комерційної ефективності застосування ЕП нами розраховано залежності зміни ціни використовуваного СГ ($C_{СГЕП}$) відповідно до методики [9, 10] від процентного вмісту водню (рис. 4).

Дані залежності мають такі аналітичні рівняння:

$$C_{СГ} = -18,586 \cdot q_B + 13,874. \quad (9)$$

Коефіцієнти кореляції для рівняння (9) $R^2=1,0$.

Застосування різних ЕП забезпечується додаванням до СГ різної кількості водню, а тому комерційна ефективність застосування ЕП у цьому випадку буде різною.

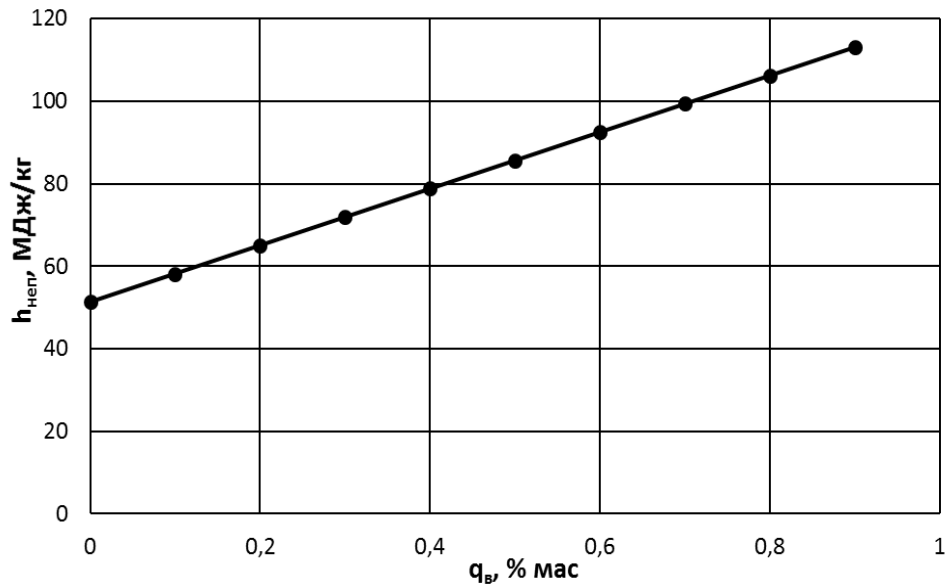


Рисунок 2 – Графік залежності зміни нижчої теплоти згоряння ЕП від процентного вмісту водню

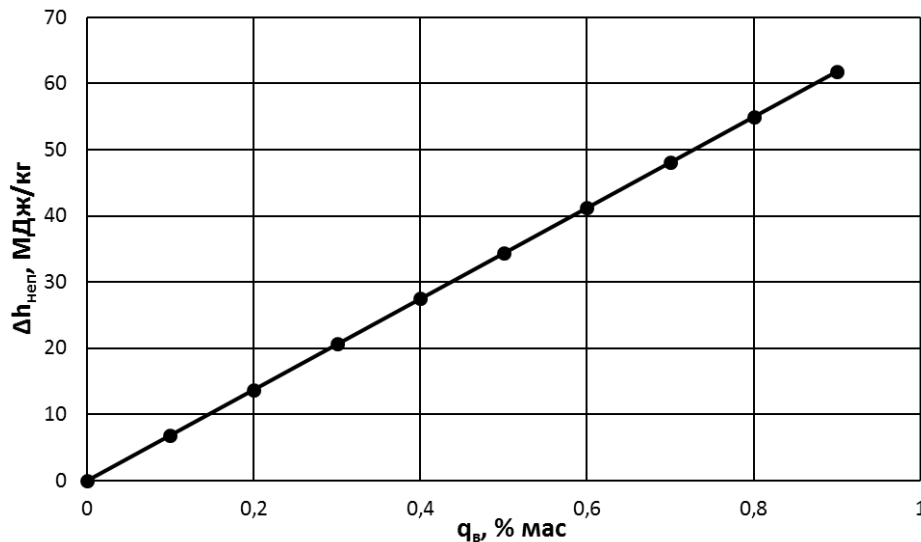


Рисунок 3 – Графік залежності приросту $\Delta h_{неп,р}$ у ЕП від процентного вмісту водню

При додаванні кожної порції водню до палива було проведено розрахунок ціни на СГ, а тому за отриманими даними розрахунку побудуємо залежності зміни ціни $\Delta C_{СГЕП}$ від процентного вмісту в ЕП водню (рис. 5).

Одержана залежність економічної ефективності використання водню в ЕП описується рівнянням

$$\Delta C_{СГ} = 18,584 \cdot q_{в} - 0,0015. \quad (10)$$

Коефіцієнт кореляції для рівняння (10) рівний $R^2=1,0$.

Із проведених розрахунків видно, що із збільшенням процентного масового вмісту водню в ЕП досягається збільшення комерційної ефективності за рахунок використання в ЕП стисненого газу з низькою теплотворною здатністю.

Висновки

Отже, для прийнятих цін на СПГ і водень та за умов однакової теплотворної здатності еквівалентного палива і СПГ з проведених розрахунків видно, що із збільшенням процентного масового вмісту водню в паливних сумішах СПГ і водню досягається збільшення економічної ефективності. Це відбувається за рахунок використання в паливних сумішах СПГ з низькою теплотворною здатністю, а отже, і низької вартості. Як варіант це може бути біогаз.

При застосуванні добавок водню до СПГ з низькою теплотворною здатністю в кількості до 70% масових можна досягнути зниження вартості СПГ на кожному кілограмі до 12,5 грн.

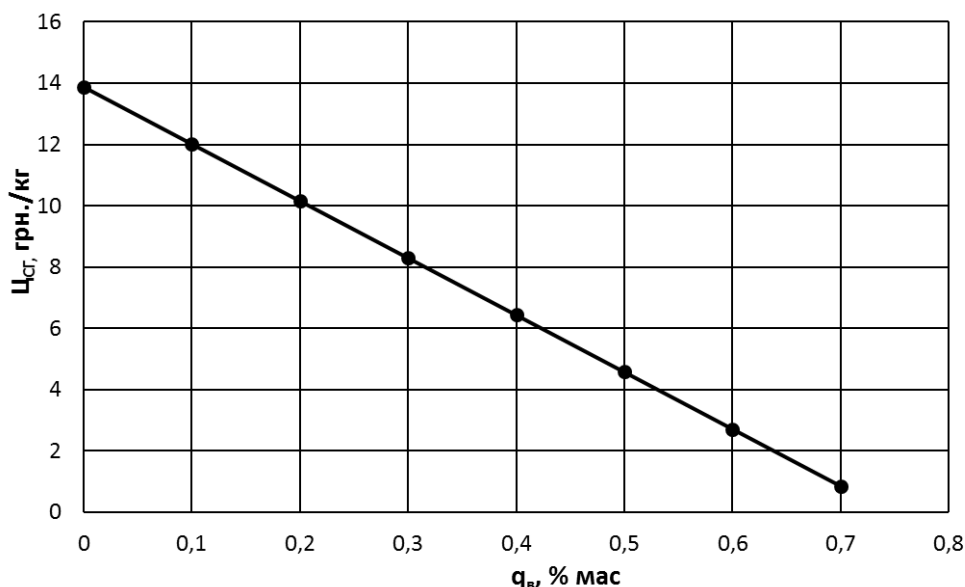


Рисунок 4 – Залежності зміни ціни СГ використаного в ЕП від процентного вмісту водню

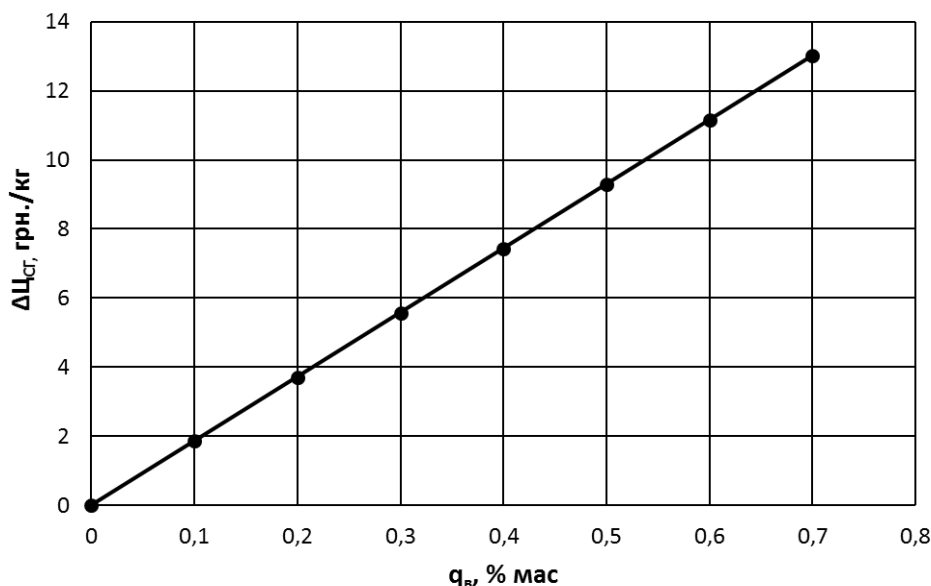


Рисунок 5 – Ефективності застосування ЕП від відсоткового вмісту водню

Такий ефект при додаванні водню до СПГ вказує на перспективність даного напрямку використання водню та доцільність подальшого його дослідження.

Література

1. Вреде І., Сааков В. Паливо майбутнього - "зелений" водень: Німеччина інвестує мільярди. *Новини й аналітика про Німеччину*. 2021. URL: <https://p.dw.com/p/40eJC>
2. Карп І.М. Водень: властивості, виробництво та особливості використання. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2020. № 2. С. 4-13.
3. Largue P. Hydrogen: Five potential game-changers to watch. *Power Engineering International*. 2020. PEI ISSUE 5.
4. Tommy I. HyDeploy: The UK's First Hydrogen Blending Deployment Project. *Clean Energy*. 2019. Vol. 3, Iss. 2. P. 114-125.
5. Карп І.М. Водень: сучасний стан проблеми та напрями майбутнього використання. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 5. С. 15-23.
6. Сорока Б.С., П'яних К.Є., Згурський В.О., Горупа В.В., Кудрявцев В.С. Енергетичні та екологічні характеристики побутових газових приладів при використанні метано-водневої суміші як паливного газу. *Нафтогазова галузь України*. 2020. № 6. С. 3-13.

7. Карп І.М. Водень: властивості, виробництво та особливості використання. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2020. № 2. С. 4-13.

8. Карп І.М. Водень в електро- та транспортній енергетиці. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 1. С. 64–70.

9. Гутаревич Ю.Ф., Говорун А.Г., Корпач А.О., Мороз О.Г. Оцінка ефективності додавання спиртових сполук до бензину. *Автомобільних України*. 2004. № 3. С. 17-19.

10. Мельник В.М. Ефективність використання альтернативного палива з відновлювальних джерел на дизельних двигунах. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2018. №1 (17). С. 91-99.

9. Hutarevych Yu.F., Hovorun A.H., Korpach A.O., Moroz O.H. Otsinka efektyvnosti dodavania spyrtovykh spoluk do benzynu. *Avtoshliakhovykh Ukrainy*. 2004. No 3. P. 17-19. [in Ukrainian]

10. Melnyk V.M. Efektyvnist vykorystannia alternatyvnoho palyva z vidnovliuvalnykh dzherel na dyzelynykh dvyhunakh. *Ekolohichna bezpeka ta zbalansovane resursokorystuvannia*. 2018. No 1 (17). P. 91-99. [in Ukrainian]

References

1. Vrede I., Saakov V. Palyvo maibutnoho - "zelenyi" voden: Nimechchyna investuie miliardy. Novyny u analityka pro Nimechchynu. 2021. URL: <https://p.dw.com/p/40eJC>. [in Ukrainian]

2. Karp I.M. Voden: vlastyvoli, vyrobnytstvo ta osoblyvosti vykorystannia. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia*. 2020. No 2. P. 4-13. [in Ukrainian]

3. Lague R. Hydrogen: Five potential game-changers to watch. *Power Engineering International*. 2020. PEI ISSUE 5.

4. Tommy I. HyDeploy: The UKs First Hydrogen Blending Deployment Project. *Clean Energy*. 2019. Vol. 3, Iss. 2. P. 114-125.

5. Karp I.M. Voden: suchasnyi stan problemy ta napriamy maibutnoho vykorystannia. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2020. No 5. P. 15–23. [in Ukrainian]

6. Soroka B.S., Pianykh K.Ie., Zghurskyi V.O., Horupa V.V., Kudriavtsev V.S. Enerhetichni ta ekolohichni kharakterystyky pobutovykh hazovykh prykladiv pry vykorystanni metanovodnevoi sumishi yak palyvnoho hazu. *Naftohazova haluz Ukrainy*. 2020. No 6. P. 3–13. [in Ukrainian]

7. Karp I.M. Voden: vlastyvoli, vyrobnytstvo ta osoblyvosti vykorystannia. *Enerhotekhnolohii ta resursozberezhennia*. 2020. № 2. P. 4-13. [in Ukrainian]

8. Karp I.M. Voden v elektro- ta transportnii enerhetytsi. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2020. No 1. P. 64–70. [in Ukrainian]