

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ НА ОСНОВІ ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ЗА РАХУНОК ЗВОЛОЖЕННЯ ПОВІТРЯ

І.В. Феофілов, інженер

Проведено аналіз різних типів когенераційних установок з точки зору найбільшої економії палива, наведено порівняння існуючих засобів додавання води до паливно-повітряної суміші у ДВЗ і показано можливості підвищення ефективності когенераційної установки на основі ДВЗ за рахунок зволоження дуттьового повітря.

Когенераційна установка, додавання води до палива, конденсаційні утилізатори теплоти.

Постановка проблеми. Комбіноване вироблення енергії за допомогою когенераційних установок (КГУ) визнано однією з найперспективніших технологій, що дозволяє забезпечити ефективне енергопостачання поряд з вирішенням завдань збереження палива і покращення екології. Серед багатьох типів когенераційних установок цікаво було б виділити тип когенераційних установок, що дозволяють отримати найбільшу економію палива, і розглянути можливості підвищення ефективності їх роботи.

Аналіз останніх досліджень. Високі енергетичні показники КГУ обумовлені утилізацією супутнього тепла, що утворюється при прямому виробленні електроенергії. Головним показником енергоефективності КГУ є сумарний коефіцієнт корисної дії (ККД), який відображає ефективність використання палива, його ще називають коефіцієнтом використання палива [1]. Сумарний ККД є відношенням виробленої установкою електричної і теплової енергії до енергії витраченого палива. В одиницях потужності сумарний ККД КГУ можна записати так:

$$\eta = \frac{N_e + Q_m}{Q_{коз}} = \eta_e + \eta_m ,$$

де N_e – корисна електрична потужність установки, яка дорівнює електричній потужності на клеммах генератора за вирахуванням електричної потужності, яка використовується на власні потреби; Q_m – корисна тепла потужність, що передається користувачу; $Q_{коз}$ – теплота, що виділяється при спалюванні палива в когенераційній установці за одиницю часу; η_e і η_m – електричний і тепловий ККД КГУ відповідно.

© І.В. Феофілов, 2013

Серед енергогенеруючих установок, які спалюють паливо, КГУ мають найбільший ККД, який складає близько 90–92%, розрахований за нижчою теплотою згоряння. І хоча сумарний ККД різних типів КГУ приблизно однаковий, співвідношення електричного і теплового ККД в них різні. Сумарний ККД КГУ не показує, яке співвідношення вироблення теплової і електричної енергії найвигідніше при когенерації і, відповідно, не показує який тип КГУ дозволяє отримати найбільшу економію палива при його використанні.

Мета досліджень. Виділити тип когенераційних установок, що дозволяють отримати найбільшу економію палива, і розглянути можливості підвищення ефективності їх роботи.

Результати досліджень. Інформацію, щодо найбільшої економії палива, можна отримати, аналізуючи коефіцієнт економії палива ε для КГУ з різним співвідношенням вироблення теплової та електричної енергії при однаковому значенні сумарного ККД. Коефіцієнт економії палива ε характеризує зниження витрат палива на вироблення теплової та електричної енергії при когенерації по відношенню до витрат палива при окремому виробленні тих самих енергій:

$$\varepsilon = \frac{Q_{окр} - Q_{ког}}{Q_{окр}},$$

де $Q_{ког}$ і $Q_{окр}$ – теплова енергія витраченого палива при виробленні теплової і електричної енергії за когенераційної схемою і при окремому виробленні тих самих енергій, відповідно.

Питомі витрати палива (в одиницях теплоти) для отримання тих самих величин електричної та теплової потужності при окремому виробленні цих енергій становлять:

$$Q_{окр}^e = \frac{N_e}{\eta_{окр}^e} = \frac{\eta_e \cdot Q_{ког}}{\eta_{окр}^e}; \quad Q_{окр}^m = \frac{N_m}{\eta_{окр}^m} = \frac{\eta_m \cdot Q_{ког}}{\eta_{окр}^m}.$$

Загальні витрати палива при окремому виробленні енергій дорівнюють:

$$Q_{окр} = Q_{окр}^e + Q_{окр}^m = \left(\frac{\eta_e}{\eta_{окр}^e} + \frac{\eta_m}{\eta_{окр}^m} \right) \cdot Q_{ког}.$$

Тоді рівняння для коефіцієнту економії палива приймає вигляд:

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{\eta_e}{\eta_{окр}^e} + \frac{\eta_m}{\eta_{окр}^m} \right) - 1}{\left(\frac{\eta_e}{\eta_{окр}^e} + \frac{\eta_m}{\eta_{окр}^m} \right)}.$$

Виходячи з відомих даних щодо сумарного ККД КГУ і співвідношення виробленої в КГУ теплової та електричної енергії можна розрахувати значення коефіцієнту економії палива для різних типів КГУ.

Розглянемо два граничні випадки. Перший граничний випадок, коли співвідношення виробленої в КГУ теплової та електричної енергії найбільше (близько 10), характерний для енергетичної надбудови парових і водогрійних котлів електрогенеруючим обладнанням з газотурбінним приводом. Другим граничним буде випадок, коли співвідношення виробленої теплової та електричної енергії – мінімальне (близько 1). КГУ, що відповідає цьому випадку, включає в свій склад, як правило, двигун внутрішнього згоряння і котел-утилізатор. На такій установці отримують максимальну електричну потужність. При спалюванні додаткового палива в активному котлі-утилізаторі отримують проміжні показники між розглянутими граничними. Якщо прийняти сумарний ККД КГУ в обох граничних випадках однаковим (наприклад: $\eta = 0,9$), а ККД окремого вироблення теплової та електричної енергії такими що дорівнюють $\eta_e^{окр} = 0,32$ і $\eta_m^{окр} = 0,8$, відповідно, і використати пропорційний метод розподілу витрат, то шляхом нескладних математичних розрахунків отримаємо, що у першому граничному випадку коефіцієнт економії палива дорівнює близько 0,3, а у другому – більше 0,54. Таким чином, при однаковому значенні сумарного ККД найбільше значення економії палива дозволяє отримати та КГУ, в якій співвідношення виробленої теплової і електричної енергії найменше. Тобто, найбільшій економії палива можна досягти в КГУ на основі двигуна внутрішнього згоряння і тому в подальшому будемо розглядати саме такий тип КГУ.

У КГУ корисними продуктами є вироблені електрична і теплова енергії. На рис. 1 показано можливості підвищення ефективності КГУ. Для цього потрібно збільшити електричну і/або теплову потужності КГУ. Як показано вище, збільшення сумарного ККД КГУ повинно відбуватися, в першу чергу, за рахунок підвищення її електричної складової, що дозволяє отримати найбільші значення економії палива. Незважаючи на те, що значення електричної потужності для даного типу палива і даного типорозміру енергогенеруючого обладнання є величиною, заданою виробником ДВЗ, шляхи для підвищення η_e без внесення змін у конструкцію самого двигуна існують. Насамперед, це – інтенсифікація процесів, що протікають у камері згоряння двигуна. І таких шляхів може бути декілька. Один із них це – додавання води в процесі спалювання палива. Історично склалося так, що дослідження щодо впливу доданої води на показники роботи двигуна проводились для пересувних

транспортних засобів. Результати цих дослідів повною мірою можуть бути використані для аналізу можливостей підвищення ефективності роботи КГУ на основі ДВЗ.

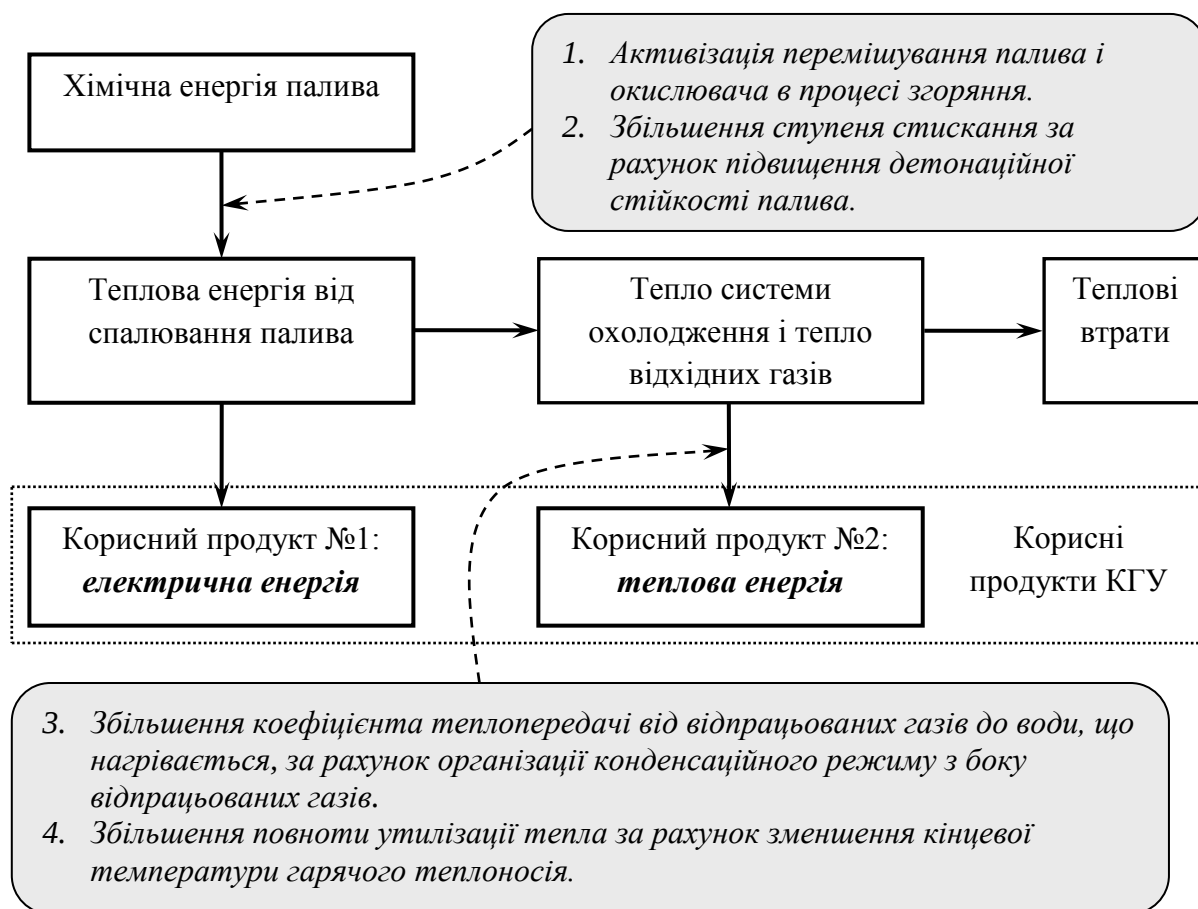


Рис. 1. Можливості підвищення ефективності КГУ.

Присутність води в паливно-повітряній суміші призводить до активного її перемішування в процесі спалахування і горіння суміші. В результаті чого, збільшується площа контакту палива та окислювача і, відповідно, зростає теплота, що виділяється при спалюванні одиниці палива. Приріст електричної потужності при додаванні до 20% води складає близько 10–15 % [2]. Відомо, що спалювання палива з водою призводить до зменшення теплонапруженості двигуна, підвищення надійності його роботи і збільшення детонаційної стійкості палива, що дозволяє збільшити ступінь стискування та отримати ще більші електричні потужності. При незмінній ступені стискування додавання води дозволяє використовувати пальне з меншим октановим числом, а отже більш дешеве. Дані про детонаційну стійкість бензинів з різною кількістю доданої води наведено в таблиці [3]. Крім того, додавання води до палива покращує екологічні показники енергетичної установки: зменшується концентрації оксидів азоту і вуглецю, що утворюються.

Експерименти для чистого ізооктану та ізооктану з 10 % води показують, що при такому вмісті води в суміші кількість CO у відпрацьованих газах двигуна падає на 6 %, а NO_x — на 8 % [4].

Значення октанового числа автобензинів за моторним методом.

Паливо	Кількість доданої води			
	0%	5%	10%	20%
Бензин А-66	66	66,5	67,5	72
Бензин А-72	72	72,5	74	76
Бензин А-76	76	77	78	81
Бензин АІ-93	85	85,5	86	88

Крім того, додавання води до палива покращує екологічні показники енергетичної установки: зменшується концентрації оксидів азоту і вуглецю, що утворюються. Експерименти для чистого ізооктану та ізооктану з 10 % води показують, що при такому вмісті води в суміші кількість CO у відпрацьованих газах двигуна падає на 6 %, а NO_x – на 8 % [4].

Значне підвищення октанових чисел палива пояснюється одними авторами зниженням температури горіння паливно-повітряної суміші за рахунок випаровування доданої води. Інші автори пов'язують антидетонаційні властивості води не лише із зниженням температури робочого процесу, але й з безпосередньою участю води в процесі горіння. Вода в певних концентраціях гальмує розвиток ланцюгових реакцій передполум'яного окислення вуглеводнів. Між перекисними радикалами і гідроксильною групою води утворюється водневий зв'язок. Природно, що при цьому активність радикалів знижується, і це у свою чергу підвищує детонаційну стійкість паливних сумішей.

Додавання води до палива здійснюють зазвичай або вприскуванням води в паливно-повітряну суміш перед самим її спалюванням [5, 6], або шляхом використання водно-паливної емульсії [7, 8], яку заздалегідь готують. В експлуатаційних умовах двигуни з вприскуванням води працюють не цілком стабільно. Це пов'язано з нерівномірним розподілом води по циліндрах двигуна. Крім того, краплі води більше 5 мкм, що потрапляють в циліндри двигуна, можуть не встигати випаруватися в процесі згоряння палива і тоді відбувається бомбардування робочих поверхонь циліндра і поршня, що призводить з часом до їх фізичного зносу. Використання водно-паливних емульсій дозволяє ці труднощі обійти. Проте з'являються інші. Для створення метастабільної водно-паливної емульсії з нерозчинних один в одному рідин використовуються треті речовини – емульгатори, які навіть при

нетривалому їх використанні викликають утворення нагару в камері згоряння і перебої в роботі двигуна. Крім того, емульгатори і продукти їх розпаду мають бути нетоксичними, вони не повинні знижувати детонаційну стійкість палива. Ці додаткові вимоги ускладнюють і без того складне завдання створення стійких водно-паливних емульсій. Тому, робляться спроби готувати емульсії безпосередньо на автомобілі: розробляються бортові диспергуючі пристрої, що дозволяють за допомогою гідророзпилювачів або ультразвукових генераторів отримувати в дисперсійному середовищі краплі розміром менше 5 мкм. Проте і в цих випадках для стійкості емульсій необхідно вводити емульгатори, хоча і в менших кількостях. Розглядаючи переваги і недоліки додавання води до палива, слід зазначити і те, що в обох варіантах застосовується дистилят, отримання якого пов'язано з додатковими істотними енерговитратами і наявністю відповідного обладнання. Тому, заміна частини палива водою не дає відповідної економії палива, оскільки для одержання дистильованої води також потрібно витратити деяку кількість палива. Якщо використовувати недистильовану воду, то при тих її витратах, що рекомендуються для додання до палива, розчинені у воді солі неодмінно повинні привести до утворення нагару в камері згоряння і до серйозних порушень у роботі двигуна вже через 100–200 годин роботи. Адже при спалюванні 10 л палива в двигун вноситься до 2 л води, а разом з нею до 200 мг різних солей. Крім того, для приготування водно-паливних емульсій так само, як і для отримання необхідного тиску при вприскуванні води, також доводиться витрачати додаткову енергію. Тому говорити про істотну економію палива в обох випадках не доводиться.

Різні варіанти додавання води до паливно-повітряної суміші розробляються для двигунів, розташованих на пересувному транспортному засобі, а це зумовлює необхідність розташування на ньому додаткових пристроїв, що, в свою чергу, призводить до зменшення корисного об'єму на транспорті і збільшення витрат палива. Ці недоліки можуть бути усунені, якщо додавання води виконувати для двигунів, які є основою стаціонарно розташованої КГУ. В цьому випадку не має обмежень щодо розташування необхідних пристроїв та відсутні витрати палива, що пов'язані з їх пересуванням разом з транспортним засобом. Більшість інших недоліків від використання води, при збереженні її позитивного впливу на процес згоряння, може бути усунена, якщо використовувати воду у вигляді водяної пари в складі зволоженого дуттьового повітря [9, 10]. У цьому випадку до циліндрів двигуна не потрапляють частки води більше 5 мкм, розподіл води у паливній суміші більш рівномірний, що забезпечує стабільну і надійну роботу

двигуна. Крім того, не має необхідності в емульгаторі і, відповідно, не має відкладень у двигуні, пов'язаних із ним.

Зволоження відбувається у контактному теплообмінному апараті за рахунок барботування через шар нагрітої води повітря, яке всмоктується поршнями у циліндри двигуна. Для цього достатньо нагріти дуттьове повітря в контактному теплообміннику на 10–15 °С. Наприклад, якщо на вході в теплообмінник повітря має температуру 20 °С і відносну вологість 60 %, а на виході – 30 °С і 90 % (відповідно), то з урахуванням того, що на спалювання 1 кг бензину необхідно близько 14,7 кг повітря, отримуємо додавання води до палива у кількості 20 %. При цьому загальні витрати тепла на зволоження повітря не перевищують 2 % від теплоти спалювання палива. Додатковий гідродинамічний опір не перевищує 2 кПа. Для нагрівання води, що зволожує дуттьове повітря, використовується тепло системи охолодження двигуна. Причому, для зволоження дуттьового повітря може бути використана вода практично будь-якого ступеня забрудненості, тобто відпадає необхідність у дорогому дистилляті. Крім того, використання зволоженого повітря не призводить до сольових відкладень у циліндрах двигуна, що позитивно позначається на його безаварійній роботі.

Зволоження дуттьового повітря важливе для КГУ ще й тим, що збільшується вологість відпрацьованих газів. Це дозволяє отримати більшу температуру точки роси при утилізації теплоти відпрацьованих газів двигуна і реалізувати для утилізації тепла більш ефективні конденсаційні теплообмінники. Енергетичний баланс КГУ на основі ДВЗ, що працює на бензині, при зволоженні дуттьового повітря і без нього показано на рис. 2.

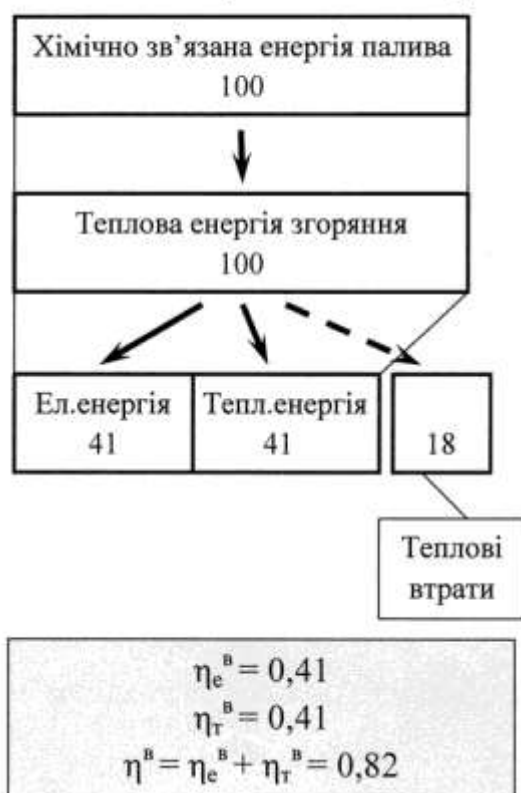
Дані енергетичного балансу перераховані на вищу теплоту згоряння палива, яка для бензину дорівнює $Q_{\text{в}}^{\text{р}} = 47,3$ МДж/кг. Сумарний ККД КГУ без зволоження дуттьового повітря по нижчій теплоті згоряння дорівнює: $\eta = 0,9$ (нижча теплота згоряння бензину: $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 43$ МДж/кг).

Висновки

1. З усіх засобів додавання води до паливно-повітряної суміші для стаціонарно розташованої КГУ зволоження дуттьового повітря є найефективнішим.

2. Зволоження дуттьового повітря, збільшення ступеня стискування і подальша конденсаційна утилізація тепла відхідних газів дозволяють збільшити як електричний, так і тепловий ККД, і отримати сумарний КГУ до 0,98 за вищою теплотою згоряння палива.

Без зволоження дуттьового повітря



Із зволоженням дуттьового повітря

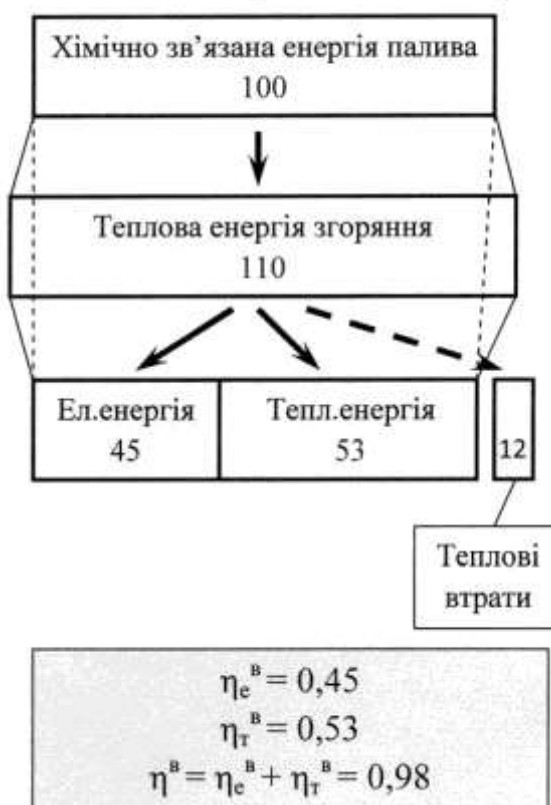


Рис. 2. Схеми енергетичного балансу КГУ на основі ДВЗ із зволоженням і без зволоження дуттьового повітря (за вищою теплотою згорання палива).

Список літератури

1. Клименко В.Н. Когенерационные системы с тепловыми двигателями: справ. пособие: [в 3 ч.] Ч. 1: Общие вопросы когенерационных технологий / В.Н. Клименко, А.И. Мазур, П.П. Сабашук. – К.: ИПЦ АЛКОН НАН Украины, 2008. – 560 с.
2. Смаль Ф.В. Перспективные топлива для автомобилей / Ф.В. Смаль, Е.Е. Арсенов. – М.: Транспорт, 1979. – 151 с.
3. Гуйва С.В. Вода как альтернативное топливо / С.В. Гуйва // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – Мелітополь: ТДАТУ, 2009. – Вип. 9, т. 5. – С. 176–182.
4. Ефремов П.К. К вопросу о дополнительном питании тепловых двигателей водой / П.К. Ефремов // Труды Всесоюзной научной конференции «Защита воздушного бассейна от загрязнения токсичными выбросами транспортных средств». – Харьков: Ин-т проблем машиностроения, 1977. – Ч. 1. – С. 221.
5. Колодин А.М. Результаты испытаний дизеля 6ЧН 16/22, оборудованного системой испарительного охлаждения наддувочного воздуха / А.М. Колодин // Труды Новосибирского института инженеров водного транспорта. – Новосибирск: НИИВТ, 1981. – Вып. 158. – С. 76–87.
6. Капустин В.В. Испарительное охлаждение наддувочного воздуха / В.В. Капустин, А.М. Колодин, Н.Н. Сорокин // Речной транспорт, 1978. – № 5. – С. 35.
7. Лебедев О.Н. Водотопливные эмульсии в судовых дизелях / О.Н. Лебедев, В.А. Сомов, В.Д. Сисин. – Л.: Судостроение, 1988. – 108 с.

8. Лерман Е.Ю. Высококцентрированные топливные эмульсии – эффективное средство улучшения экологических показателей лёгких быстроходных дизелей / Е.Ю. Лерман, О.А. Гладков // Двигателестроение. – 1986. – № 10. – С. 14–17.

9. А.с. 1306220 СССР, МКИ³ F 02 В 43/00. Способ работы двигателя внутреннего сгорания и двигатель внутреннего сгорания / А. А. Долинский, А. И. Гуров, А. Н. Подгорный, А. И. Мищенко, Н. А. Гогадзе, А. П. Гартвиг, И. В. Феофилов (СССР). – №3844027 ; заявл. 20.11.84 ; опубл. 07.02.87. Бюл. № 15.

10. А.с. 1347602 СССР, МКИ³ F 02 В 43/00. Способ работы двигателя внутреннего сгорания / А. А. Долинский, А. И. Гуров, И. В. Феофилов (СССР). – №4020981 ; заявл. 12.02.86; опубл. 07.08.87. Бюл. № 39.

Проведен анализ разных типов когенерационных установок с точки зрения наибольшей экономии топлива, приведено сравнение существующих способов добавления воды к топливно-воздушной смеси в ДВС и показаны возможности повышения эффективности когенерационной установки на основе ДВС за счет увлажнения дутьевого воздуха.

Когенерационная установка, добавление воды к топливу, конденсационные утилизаторы теплоты.

The analysis of different types of cogeneration settings from point of most economy of fuel is conducted, comparison of existent methods of addition of water to fuel-air mixture in combustion engines is cited and possibility of increase of efficiency of the cogeneration setting on the basis of combustion engine on account of moistening of air are showed.

Cogeneration setting, addition of water to fuel, heat condensation settings.

УДК 517.926

УМОВИ ВИНИКНЕННЯ РОЗВ'ЯЗКІВ СЛАБОЗБУРЕНИХ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ (ВИПАДОК $k = -1$)

Р.Ф. Овчар, кандидат фізико-математичних наук

Запропонована схема знаходження коефіцієнтних умов існування розв'язків слабозбурених крайових задач для систем з імпульсною дією в фіксовані моменти часу.

Слабозбурена лінійна неоднорідна крайова задача, однорідна крайова задача з імпульсною дією, ортопроектор, ряд, псевдообернена матриця, узагальнений оператор Гріна.

© Р.Ф. Овчар, 2013