

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Первомайський навчально-науковий інститут

Кафедра «Енергетичне машинобудування»

«Допущений до захисту»
Завідувач кафедри

«__» _____ 2023 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

на тему: Покращення паливних показників головного двигуна МаК 9М43
додаванням малих домішок водню

Виконав:
студент групи 61-ТЕМмаг-22
_____ ***Цуренко Д.М.***
(підпис)

Керівник роботи:
канд. техн. наук
(посада, науковий ступень, вчене звання)
_____ ***Галинкін Ю.М.***
(підпис)

Первомайськ - 2023 р.

АНОТАЦІЯ

Представлений дипломний проект містить у собі 88 сторінок, 29 рисунків, 10 таблиць. При підготовці проекту було використано 19 джерел інформації.

У проекті розроблений комплекс заходів щодо покращення паливних показників головного двигуна МаК 9М43С на режимах часткових навантажень шляхом використання малих домішок водню до палива. Виконано розрахунки ефективності використання запропонованих технічних рішень.

Ключові слова:

ДВИГУН ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ, ПАЛИВО, ЧАСТКОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ, ЕЛЕКТРОЛІЗЕР

Ключевые слова:

ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ, ТОПЛИВО, ЧАСТИЧНЫЕ НАГРУЗКИ, ЭЛЕКТРОЛИЗЕР

THE ABSTRACT

The diploma project includes 88 pages, 29 drawings, 10 tables. At design preparation it has been used 19 information source.

In the project it is developed a complex of actions for improvement of the main engine MAK 9M43C fuel indicators by use of small additives of hydrogen to fuel. Calculations of efficiency of use of the offered technical decisions are executed.

Keywords:

INTERNAL COMBUSTION ENGINE, FUEL, PARTIAL LOADINGS, ELECTROLYZER

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУДНА ТА ЙОГО СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ.....	5
1.1 Опис судна	5
1.2 Склад енергетичної установки.....	6
1.2 Двигуни МАК – Катерпиллар М43	7
РОЗДІЛ 2. Розрахунок робочого циклу двигуна.....	16
2.1 Фізичні основи процесів самозаймання і згоряння палива	16
2.2 Передумови використання водню в якості добавок до основного палива	20
2.3 Обґрунтування пропозиції використання малих домішок водню шляхом проведення теплового розрахунку робочих циклів.....	22
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ПЕРЕРОБКИ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ ДВИГУНА	44
3.1 Способи виробництва водню	44
3.2 Отримання водню електролізом води	48
3.3 Гідридний компресор.....	59
3.4 Впорскування водню та паливна схема двигуна	68
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	74
4.1 Нормативно-правова та законодавча база охорони навколишнього середовища.....	74
4.2 Розрахунок рівня екологічної безпеки замкнутої водойми від промислових стічних вод	77
ВИСНОВКИ.....	86
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	87

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ			
Вим..	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Цуренко Д.М.			Покращення паливних показників головного двигуна МаК 9М43 додаванням малих домішок водню	Лит.	Лист	Листов
Перевір.		Галинкін Ю.М.					2	88
						61ТЕМмаг-22		
Н. Контр.		Галинкін Ю.М.						
Затв		Нестеренко В.В.						

ВСТУП

На сьогоднішній день фірма МАК входить до числа провідних з випуску сучасних СОД. Представляє безперечний інтерес концепція фірми з модернізації випущених моделей і створенню нових поколінь середньооборотних двигунів. Таку концепцію розвитку дизелебудування фірма МАК використовує при створенні нових моделей - сімейства суднових двигунів, які були запропоновані на світовому ринку.

При створенні двигуна особливе значення надавалося підвищенню ефективності його використання по наступних аспектах:

- експлуатаційної надійності (завдяки запобіганню корозії, зменшення механічного зносу, числу сполук);
- низьким експлуатаційним витратам (що досягається внаслідок невеликої витрати палива, можливості використання важкого палива, малої витрати масла на чад, тривалого терміну служби деталей, простотою установки і нескладних штекерних з'єднань).
- екологічність двигуна (відповідає міжнародним стандартам з викидів NO_x).

Ці заходи зробили машину М43 однією з найпопулярніших серед контейнеровозів. Разом з іншими машинами, дає фірмі можливість успішно конкурувати на ринку. Проте, для двигуна внутрішнього згоряння завжди актуальною лишається тема підвищення його ефективності.

Одним зі шляхів підвищення ефективності та зменшенню шкідливих викидів може бути добавка до основного палива незначної кількості водню. Така добавка повинна покращити якість паливної суміші у циліндрі двигуна та сприяти більш повному вигоранню палива.

У цьому дипломному проєкті розглядається вплив домішки 0,5% водню на режимах 50% та 25% навантаження (від номінальної потужності) для двигуна М43.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						4
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУДНА ТА ЙОГО СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

1.1 Опис судна

Сухогруз «MAERSK FALMOUTH» (IMO 9266530), узятє в якості прототипу в даному дипломному проєкті, призначене для перевезення контейнерів. Можливе перевезення 862 двадцятифутових контейнерів. Тип судна - одногвинтової, двопалубний контейнеровоз з висотою надводного борту 2,609 м, з кормової надбудовою і кормовим розташуванням машинного відділення. Судно обладнане двома кранами вантажопідйомністю 45 тонн кожен [1]. Корпус судна містить 7 водонепроникних перегородок. Екіпаж 15 чоловік.

Судно ходить під прапором Кіпру, порт приписки - Лімасол. Належить судно компанії Safe Creation Shipping Co. Ltd, і знаходиться в управлінні компанії Marlow Navigation Co. Ltd. Позивний судна – 5BMN2.



Рисунок 1.1- Загальний вигляд судна

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						5
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Класифікація:

корпус: 100 A5 з висотою надводного борту 2,609 м, контейнеровоз
IW SOLAS-II-2, Reg.19, Open-Top

машини: MC AUT.

характеристика судна:

довжина габаритна 134,44 м

зареєстровано довжина 125,08 м

зареєстровано ширина 22,50 м

теоретична висота борту 11,30 м

осадка 8,700 м

водотоннажність 9990

вантажопідйомність 6006

баластних вод 3936 м³

паливо 920 м³

побудовано в Гамбурзі в 2002 році компанією Place JJ Sietas KG
Schiffswerft GmbH & Co.

1.2 Склад енергетичної установки

1.2.1 Головний двигун

На судні встановлено один головний двигун фірми Caterpillar Motoren GmbH & Co KG, модель MaK 9 M 43, випуску 2002 року. Це чотиритактний середньообертовий дев'ятициліндровий дизельний двигун, який розвиває потужність 8100 кВт при 500 хв.⁻¹. Діаметр циліндра 430 мм, хід поршня 610 мм. Головний двигун з'єднаний з валопроводом і гвинтом регульованого кроку за допомогою спеціалізованого редуктора. Частота обертання гвинта становить 128 хв.⁻¹.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						6
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

1.2.2 Допоміжні машини

Енергетична установка складається з валогенератора потужністю 1860 кВт, двох дизель-генераторів потужністю 1155 кВт і аварійно-портового генератора потужністю 290 кВт. Також до складу енергетичної установки входить два котла. Перший виготовлений фірмою PWT Prozess-Wärmeträgertechnik GmbH, рік випуску 2002, тип котла-тепловий нагрівач масла, рідинний, максимальний робочий тиск 0,1 МПа, поверхня нагріву 45,6 м². Другий котел також зроблений фірмою PWT Prozess-Wärmeträgertechnik GmbH, рік випуску 2002, тип котла-тепловий нагрівач нафти, нагрівається від вихлопних газів, максимальний робочий тиск 0,1 МПа, поверхня нагріву 177,0 м².

1.2 Двигуни МАК – Катерпиллар М43

Середньообертові, чотиритактні двигуни, відомі під маркою МАК. раніше випускалися відомим німецьким концерном «Крупп-МАК GmbH», у 1997р акції групи «МАК - Motoren» придбала компанія «Caterpillar» і двигуни випускаються її підрозділом «Caterpillar-Motoren GmbH». Ряд потужностей двигунів охоплює 1000 - 16200 кВт. Всі двигуни з турбонаддувом і можуть працювати як на дизельних сортах палива типу MDO, так і на важких з в'язкістю, до 700сСт. На судах застосовуються в якості головних, з приводом гребного гвинта через реверс-редуктори і для приводу генераторів суднових електростанцій. З 1992 року фірма перейшла на довгоходові двигуни з S / D - 1.1-1.5.

Двигуни модельного ряду МАК М43 випускаються в 6-18 циліндровому виконанні і покривають діапазон потужностей від 5400 до 16200 кВт.

Створювалися вони в основному для використання на швидкісних контейнерних судах, ролкерах і поромах для механічного приводу гребних

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						7
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

гвинтів і в складі дизель-електричних установок. Поперечний переріз двигуна зображено на рис. 1.2.

За своїм конструктивним виконанням двигун подібний до тих, що раніше випускалися фірмою, двигунів МАК20 МАК32 і створювався з використанням досвіду їх виробництва та експлуатації.

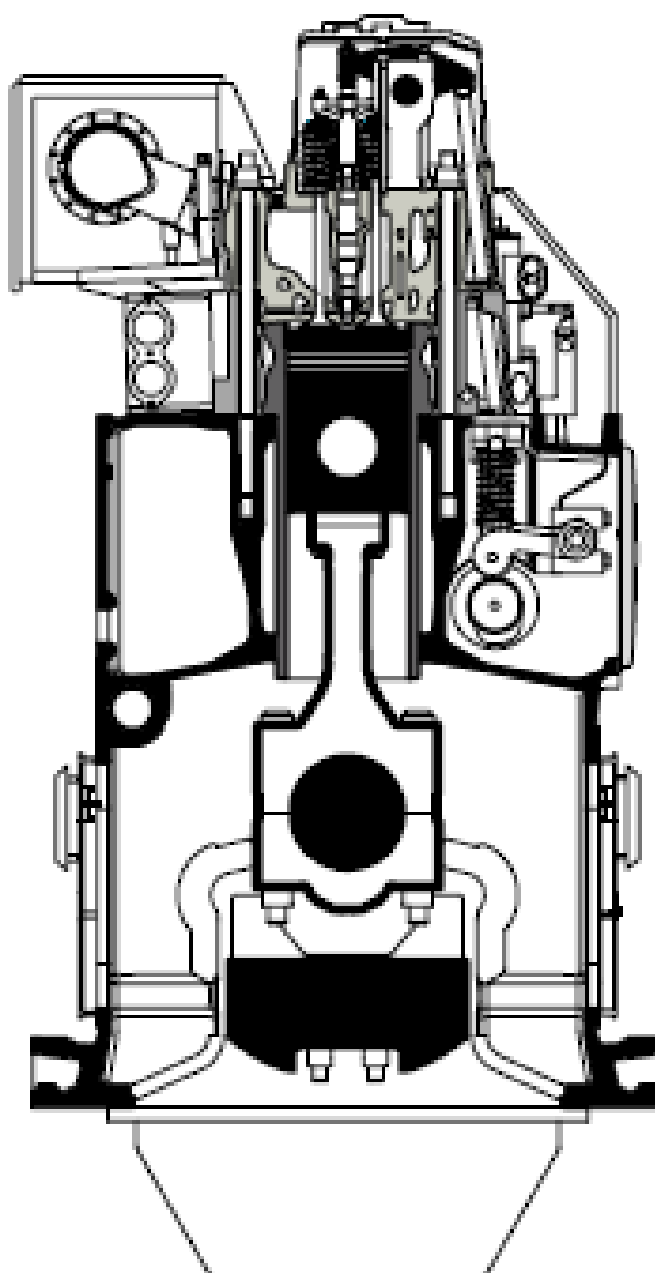


Рисунок 1.2 - Поперечний переріз двигуна

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						8
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Остов двигуна являє собою монолітний, чавунний сухий блок-картер. На верхню площину блоку встановлюється висока сорочка, зверху на неї спирається кришка циліндра і між ними утворена ємність охолодження. З неї охолоджуюча вода переходить і в кришку, а частина води (з кришки) відбирається на охолодження ГТК. В останній модифікації турбокомпресор не охолоджується, що виключає можливість корозії його корпусу.

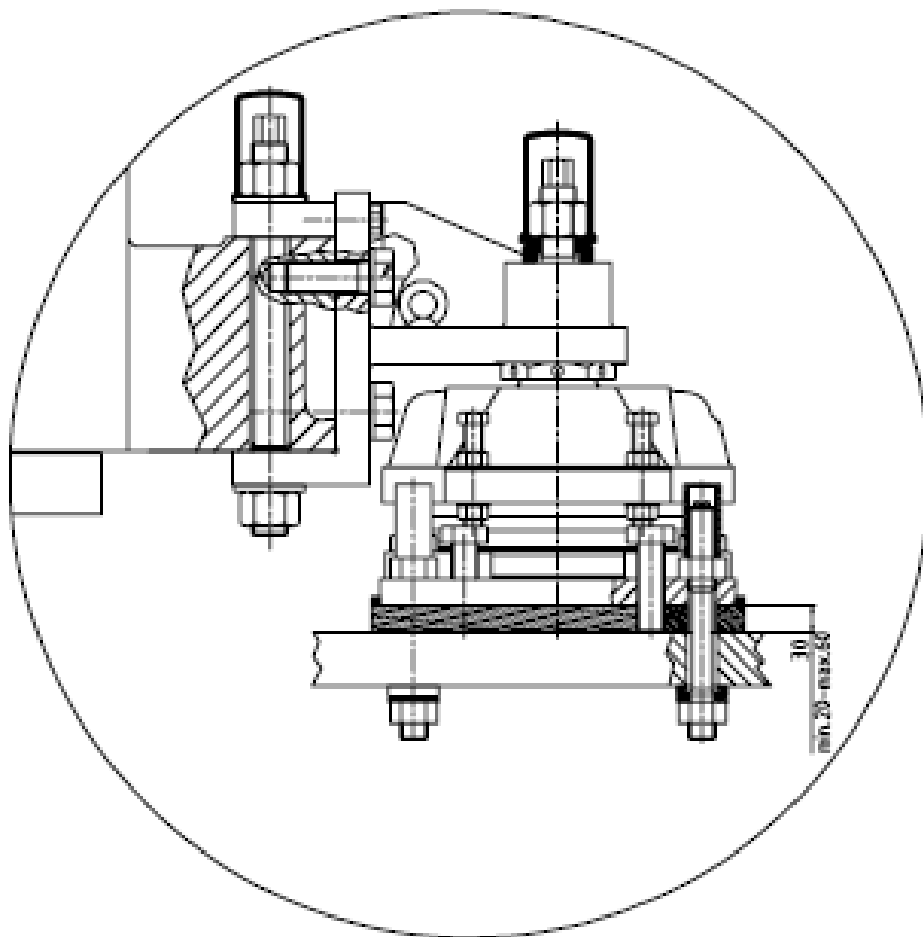


Рисунок 1.3 - Кріплення двигуна до суднового фундаменту

У втулку циліндра, до її верхньої частини, встановлюється антиполіровочне кільце, поверхня втулки азотованого, термін служби - 60 тис. годин.

Cylinder liner, Weight 709 kg

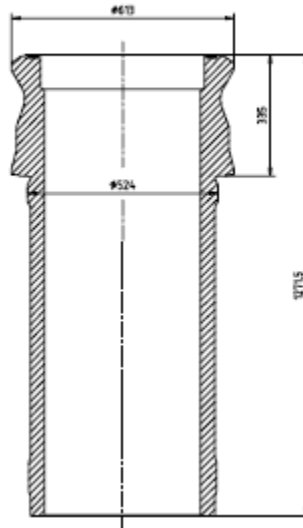


Рисунок 1.4 - Втулка циліндра

Колінчастий вал цільнокований, підвісний.

Розподільний вал складовий і складається із секцій по числу циліндрів, що істотно спрощує його демонтаж і заміну окремих секцій.

Поршень охолоджуваний, складовий - головка сталева, спідниця алюмінієва. У голівці розташовуються два компресійних і одне маслозйомне кільця. Канавка першого кільця для підвищення зносостійкості зміцнена. На робочу поверхню кільця нанесено протизношувальне наплавлення. Термін служби кілець сягає 30 тисяч годин.

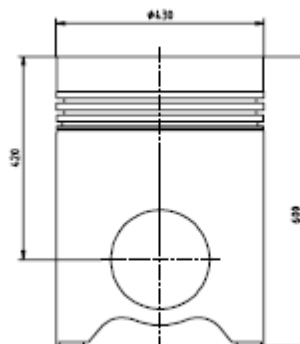


Рисунок 1.5 - Поршень

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						10
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Шатун сталевий, круглого перетину, нижня головка з прямим роз'ємом. Вкладиші мотильових і рамових підшипників тонкостінні, дво- або тришарові, застосовуються також підшипники карнавочного типу.

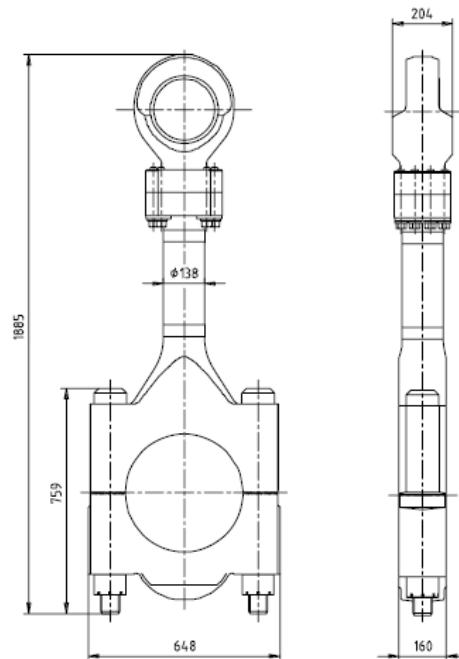


Рисунок 1.6 - Шатун

З метою полегшення приробляння підшипників і шийок валу від задирів, які можуть виникати від можливих неспіввісностей при його укладанні, фірма вдається до електролітичного покриття вкладишів м'яким цинком або оловом, товщиною кілька тисячних міліметра. Термін служби підшипників - 30 тис. годин.

Паливна апаратура. Форсунки багатоотворові, охолоджувані маслом, що відбирають із загальної системи змащення. Термін служби розпорошувачів становить 8 тис. годин. ПНВТ золотникового типу «Бош» з регулюванням по кінцю подачі. Привід плунжера ПНВТ здійснюється через важіль з роликом (рис. 1.7), сидячим па осі з ексцентриком, поворот якої механічно пов'язаний з тягою управління подачею палива. Поворот ексцентрової осі викликає позовжнє переміщення важеля ролика щодо паливного кулачка. Переміщення на зустріч обертанню кулачка призводить

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		11

до більш раннього початку подачі палива, переміщення в протилежну сторону - викликає більш пізній початок подачі.

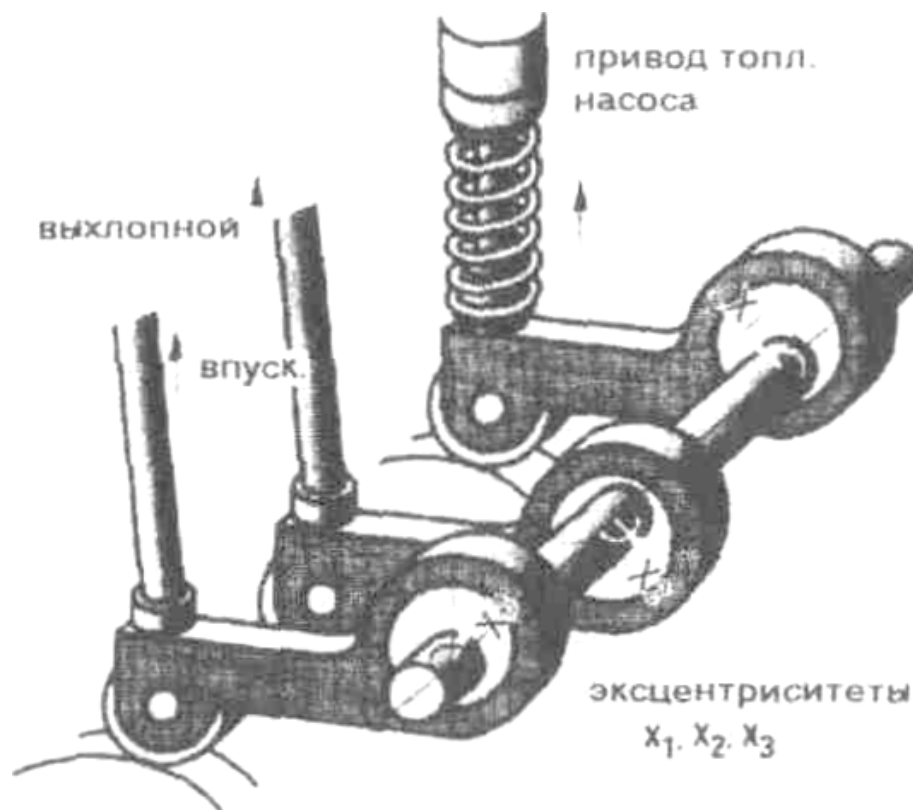


Рисунок 1.7 - Регульований привід плунжера ПНВТ і клапанів

Турбонаддув організований за імпульсною схемою, турбокомпресори мають неохолоджуваний корпус, в них застосовані підшипники ковзання з мастилом від загальної системи циркуляційного мастила. Монтаж двигуна на судновому фундаменті здійснюється з використанням патентованих антивібраторів, (рис. 1.3), що забезпечують демпфірування вібрації і структурного шуму, які виникають при роботі двигуна.

Емісія NO_x у вихлопних газах складає $12 \text{ г/кВт}\cdot\text{г}$, що лежить нижче межі ІМО.

Вихлопна система видаляє з двигунів вихлопні гази поза машинне відділення, через трубопровід, в атмосферу. Хороша вихлопна система має мінімальний зворотній тиск. Накопичення вихлопних газів, як правило, шкідливо, так як призводить до зниження витрати повітря через двигун. Окрім того, допустимий тиск має тенденцію до підвищення температури

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						12
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

вихлопних газів, що скорочують строк експлуатації скоротити випускного клапана і турбокомпресора.

Втрата тиску повинна бути зведена до мінімуму в цілях оптимізації витрати палива і теплового навантаження на двигун. Максимальна швидкість потоку 40 м / с. Максимальна втрата тиску 0,3 кПа.

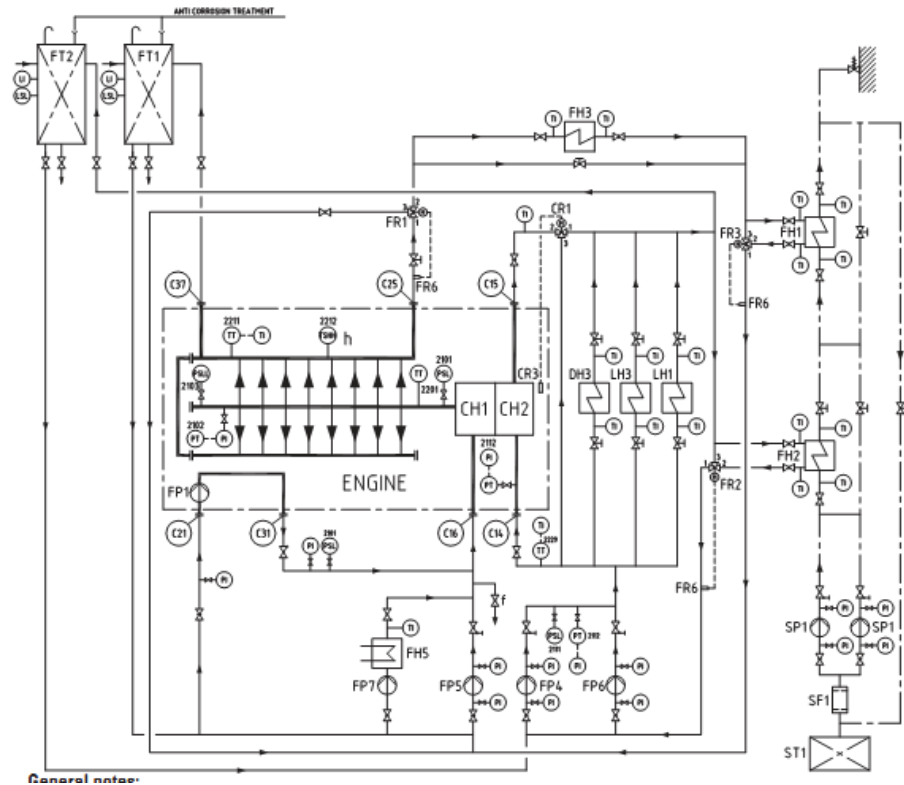


Рисунок 1.8 – Схема системи охолодження двигуна

Система охолодження

МаК двигуни як правило, використовують два замкнуті контури для охолодження води. Висока температура (НТ) контуру охолодження використовується для охолодження наддувочного повітря і двигуна. Низька температура (LT) контуру охолодження охолоджує повітря заряду і масло. Крім того, вода LT контур охолодження може бути використана для охолодження додаткового обладнання, наприклад, генератора або коробки передач. Вода для охолодження двигуна повинна бути ретельно відібрана, лікувати і її якість повинна контролюватися.

При використанні необробленої охолоджувальної води можливе виникнення корозії, ерозії та кавітації на стінках системи охолодження.

Відкладення можуть погіршити теплообмін і в результаті перегріву компонентів для охолодження.

Профілактики за допомогою антикорозійних присадок має бути здійснена до першого введення в експлуатацію ще на заводі.

Паливна система дизельних двигунів МаК призначена для спалювання широкого спектру палив. Вона складається з первинного фільтра палива DF2, фільтра грубої очистки палива DF3, підігрівача дизельного палива DH1, електричного підігрівача для дизельного палива (сепаратор) DH2, паливно-масляного радіатора для роботи MDO DH3, живильного насоса дизельного палива DP1, резервного живильного насоса дизельного палива DP2, насоса для перекачування дизельного палива DP3, насоса для перекачування дизельного палива DP5, клапана регулювання тиску палива DR2, сепаратора дизельного палива DS1, бака дизельного палива DT1, бака дизельного палива DT4, індикаторного паливного фільтра HF1, паливного насоса KP1. Схема паливної системи зображена на рисунку 1.9.

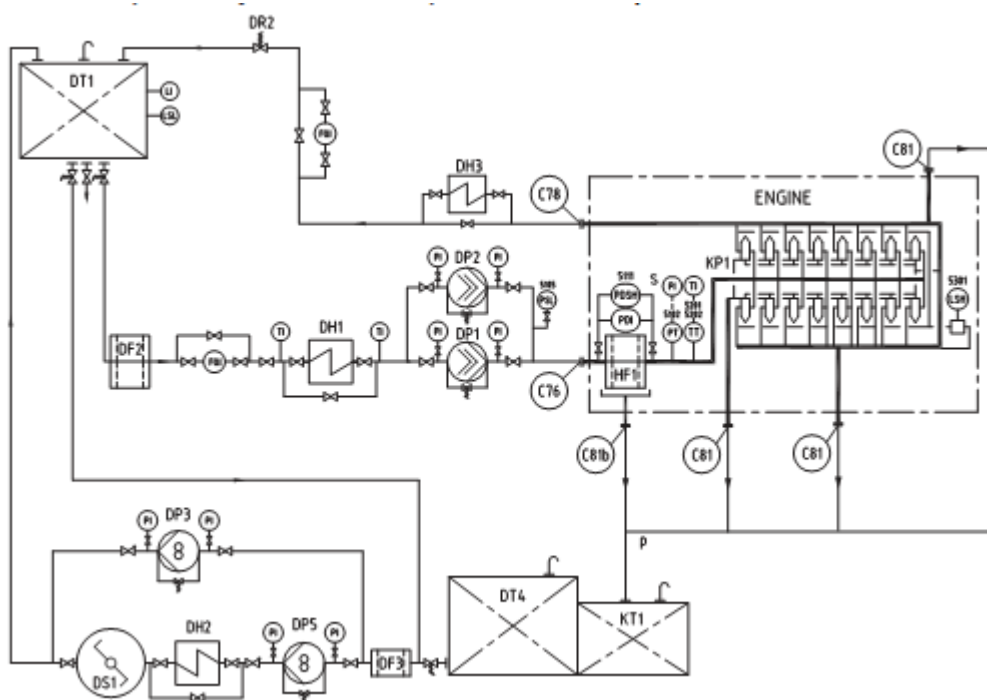


Рисунок 1.9 – Схема паливної системи двигуна

Масляна система двигуна закладається з датчика температури FR6, дуплексного масляного фільтра LF1, самоочисного масляного фільтра LF2, захисного фільтру LF3, фільтра LF4, охолоджувача мастила LH1, підігрівача мастила LH2, масляного насосу LP1, предлубрикаторного насосу LP5, насоса для перекачки (сепаратор) LP9, клапана, регулюючого температуру мастила LR1, клапана для регулювання тиску нафти LR2. Схема масляної системи зображена на рисунку 1.10. Мастила в двигуні виконує кілька основних функцій: перевезення бруду і частинок зносу в фільтрах, охолодження біляшовної частини, таких як поршневі кільця, гільзи циліндрів, клапани і головки блоку циліндрів, захист підшипників від ударів, змащування металевих поверхонь / зменшення зносу і тертя, нейтралізація агресивних продуктів згоряння, захист від корозії металевих поверхонь.

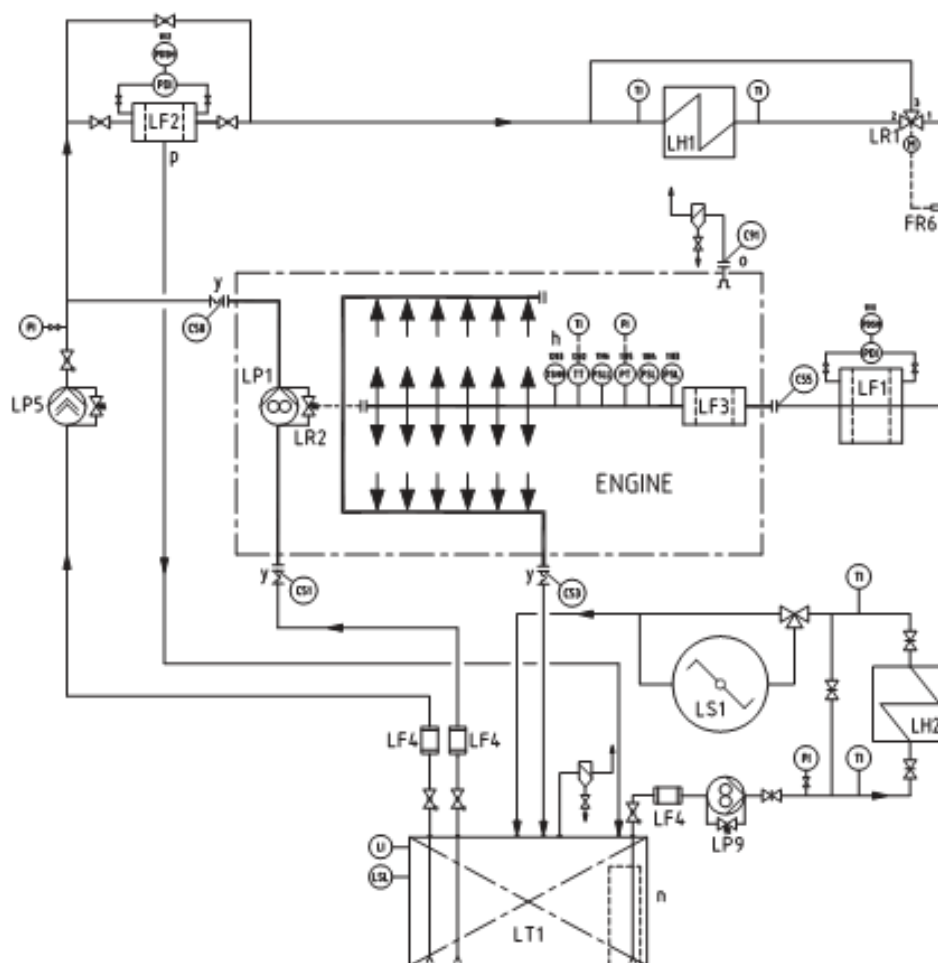


Рисунок 1.10 – Схема масляної системи двигуна

РОЗДІЛ 2

РОЗРАХУНОК РОБОЧОГО ЦИКЛУ ДВИГУНА

2.1 Фізичні основи процесів самозаймання і згоряння палива

Згорання палива в дизелях являє собою процес окислення молекул вуглеводневого палива киснем повітря з виділенням теплоти. Хімічним процесам окислення палива передують фізичні: прогрів крапель палива від повітря в камері згоряння та їх випаровування. Внаслідок малих розмірів крапель розпиленого палива (середній діаметр крапель $d_k = 20 \dots 40$ мкм) у факелі та високої температури повітря в камері згоряння (більше 500°C), ці процеси для кожної утвореної при упорскуванні краплі палива складають дуже короткий часовий інтервал (менше 1 мс). Встановлено, що процесу самозаймання палива передують також підготовчі хімічні процеси - розпад молекул і утворення проміжних продуктів передполуменового окислення. Фізико-хімічна підготовка палива до згоряння призводить до запізнення початку виділення тепла в циліндрі щодо початку подачі палива форсункою.

На рис. 2.1 показана індикаторна діаграма суднового середньообертового дизеля ($n = 500 \text{ хв}^{-1}$) в координатах $p-v$. Тут же показані моменти початку і кінця подачі палива форсункою. Момент різкого зростання тиску в кінці процесу стиснення, зазначений на малюнку точкою НВС, прийнято називати початком видимого згоряння палива. Цей момент відповідно початку інтенсивного виділення тепла внаслідок початку згоряння палива. Кутовий проміжок від початку подачі палива форсункою до моменту НВС, позначений на рис. 2.1 φ_i становить зазначене вище запізнювання самозапалення палива, тому його називають періодом затримки самозаймання палива. Так як $\varphi_i = b n \tau_i$, то затримка самозаймання за часом визначається формулою

$$\tau_i = \frac{i}{6n}$$

Для судових дизелів значення φ_i складають 2...15 мс.

Період затримки самозаймання коротше для тих палив, які термічно менш стійкі. Схильність до розпаду і до утворення легко займистих сумішей залежить від структури молекул вуглеводнів, що складають паливо.

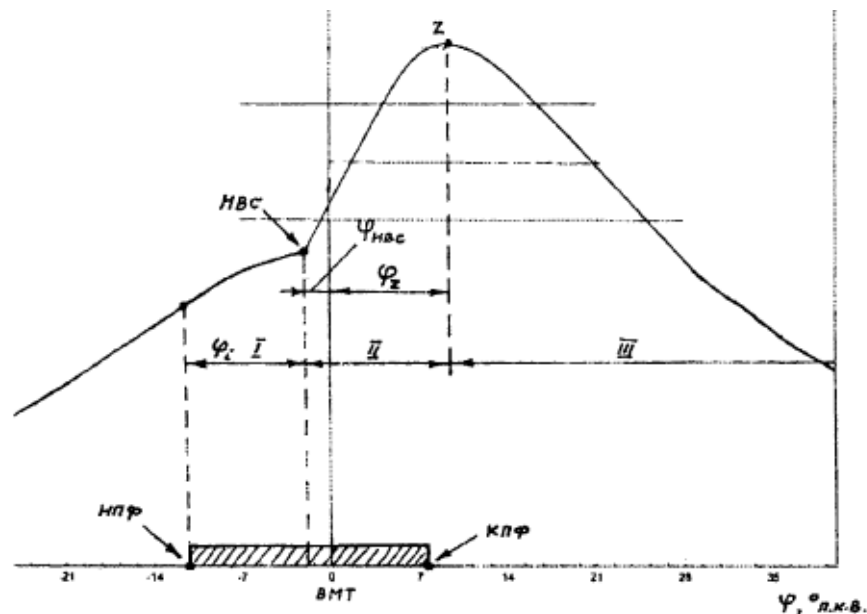


Рисунок 2.1 - Фази процесу згоряння палива: НПФ, КПФ - початок і кінець подачі палива форсункою; НВС - початок видимого згоряння палива; I - затримка самозаймання; II - швидке згоряння палива; III - дифузійне згоряння і догорання палива

Палива нафтового походження являють собою суміш великого числа вуглеводнів. З точки зору здатності до самозаймання в умовах дизеля їх можна розділити на дві групи: 1 - вуглеводні, що мають ланцюгову структуру молекул (парафіни); 2 - вуглеводні з кільцеподібною структурою з'єднання атомів вуглецю в молекулі (ароматики). Структури найпростіших молекул вуглеводнів представлені на рис. 2.2.

Вуглеводні першої групи володіють найменш міцним зв'язком вуглецевих атомів, тому легко самозаймаються в дизелі. Ароматичні

вуглеводні (2 група) відрізняються великою міцністю молекули, тому їх здатність до самозаймання мала.

Оцінка здатності палив до самозапалювання в дизелі здійснюється за його *цетановим числом* (надалі - ЦЧ), суть якого полягає в наступному. Якщо взяти в різних пропорціях два чистих вуглеводню першої та другої груп і провести випробування на двигуні їх різних сумішей, то період затримки самозаймання буде тим більше, чим більше в суміші ароматика.

Як еталон найкращої займистості прийнятий вуглеводень цетан ($C_{16}H_{32}$), йому присвоєно ЦЧ = 100; як еталон найгіршою займистості прийнятий ароматичний вуглеводень α -метилнафталін ($C_{10}H_7CH_3$), для якого ЦЧ = 0.

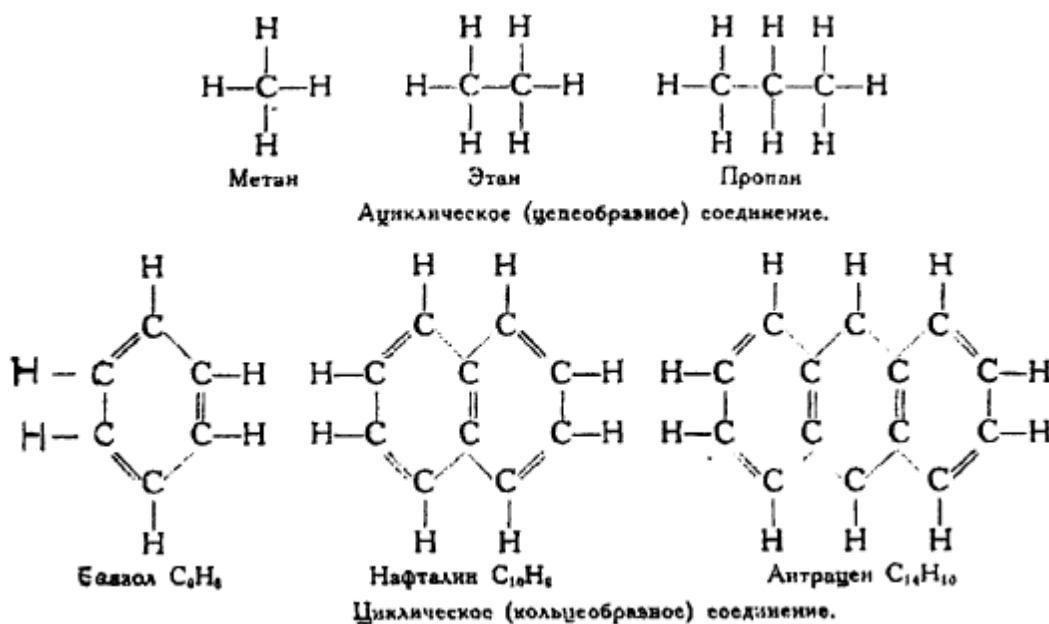


Рисунок 2.2 - Структури найпростіших молекул вуглеводнів

Цетанове число суміші цих двох вуглеводнів визначається часткою цетана в суміші. Очевидно, чим більше цетанове число палива, тим воно краще запалюється в дизелі і навпаки. Цетанові числа легких малов'язких дизельних палив визначається у спеціальній лабораторній дизельній установці шляхом порівняння їх займистості з еталонними сумішами цетана і α -метилнафталіну.

Значення ЦЧ дизельних палив становлять 50...60. Спроможності до самозаймання у важких високов'язких палив (мазутів) нижче (їх ЦЧ = 30...35) через великий вміст у них ароматичних вуглеводнів. Для цих палив оцінка ЦЧ проводиться непрямыми методами, так як через їх високу в'язкості лабораторна установка не може використовуватися.

Період затримки самозаймання прийнято вважати першою фазою процесу згоряння палива. В узагальненому вигляді залежність затримки самозаймання палива в дизелі можна виразити таким чином:

$$\varphi_i = f(p, T, \text{ЦЧ}, n)$$

де p , T - тиск і температура повітря в камері згоряння в момент початку подачі палива форсункою.

Експериментально встановлено, що φ_i нелінійно залежить від тиску, температури і ЦЧ. Збільшення тиску, температури, ЦЧ призводить до скорочення φ_i і навпаки. З частотою обертання n пов'язаний прямо пропорційно, тому підвищення оборотів двигуна призводить до його зростанням.

На величину φ_i впливають і інші фактори, наприклад, конструкція і температура стінок камери згоряння, рух повітряного заряду і інше. Цим пояснюється відмінність величин де в двигунах різного конструктивного виконання навіть при однакових значеннях параметрів p , T , ЦЧ. Залежно від поєднання перерахованих факторів період затримки самозаймання в судових дизелях становить: МОД – 3...6 ° п.к.в.; СОД – 5...15 ° п.к.в. У високооборотних дизелях φ_i може досягати 20 і більше град, п.к.в.

Друга фаза процесу згоряння - фаза швидкого згоряння палива - починається в точці НВС і завершується в момент досягнення максимального тиску газів в циліндрі (точка z на рис. 2.1).

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						19
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

2.2 Передумови використання водню в якості добавок до основного палива

Ситуація, що склалася в розвитку двигунів внутрішнього згоряння і поршневих енергетичних установках, обумовлена посиленням норм токсичності відпрацьованих газів (ОГ) і підвищенню економічності їх роботи, вимагає розробки абсолютно нових підходів до режимів роботи двигуна і організації процесу згоряння. Ефективні режими роботи двигуна забезпечуються на збіднених паливно-повітряних сумішах, на яких збільшується затримка займання, тривалість згоряння, знижуючи ефективність роботи двигуна, виникають складнощі з організацією стійкого процесу згоряння. Для забезпечення стійкої роботи двигуна на бідних сумішах необхідно інтенсифікувати процес згоряння, тобто забезпечити його протікання приблизно за той же час, що і при роботі на стехіометричному складі суміші. При цьому необхідно забезпечити протікання основної фази процесу згоряння поблизу від верхньої мертвої точки. Отже, двигун працює в області найкращих ефективних показників. В даний час для забезпечення сталого процесу на бідних сумішах, за кордоном застосовують розшарування паливно-повітряних сумішах. Але даний спосіб має наступні недоліки, а саме: високу вартість, складність і необхідність встановлення в камері згоряння паливної форсунки високого тиску для безпосереднього вприскування палива. Тому в даний час в світі активно досліджуються способи здійснення робочого процесу на бідних сумішах за рахунок активуючих добавок в паливно-повітряних сумішах.

У джерелах [10, 11, 12] показано що добавка водню вносить свої особливості в процес згоряння: значно розширює межі стійкого горіння, інтенсифікує процес згоряння, зменшує затримку займання (першу фазу), збільшує швидкість поширення полум'я, знижує токсичність ОГ по незгорілих вуглеводнів (СН) за рахунок зменшення товщини пристінкового шару і збільшення повноти згоряння, змінює токсичність по оксиду азоту.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						20
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Особливо сильно проявляється добавка водню на перехідних режимах, при збіднінні суміші, а також на режимах пуску і прогріву. Слід зазначити, що збільшення кількості який додається водню більш (2...3%) за масою палива знижує його ефективність як активізуючої добавки. Відбувається як би заміщення одного палива іншим.

Вчені та конструктори досягли в цьому напрямку значних успіхів. Ще в кінці 70-х років колективом відділу теплових двигунів Інституту проблем машинобудування АН УРСР під керівництвом І.Л.Варшавського спільно з В.А. Байковим і В.П.Журманом була здійснена конвертація автомобіля «Москвич-412» з метою експлуатації на бензоводневій суміші та водні [2]. Тоді ж на роботу з добавками водню, що зберігається в гідридах, був переведений і двигун автомобіля «ВАЗ-2101». Випробування показали, що застосування добавок водню поряд зі зниженням токсичності забезпечує скорочення витрат бензину приблизно на 40% і підвищення паливної економічності двигуна на 10 ... 15%. Завершальним етапом робіт по застосуванню бензоводневої суміші в автомобільних двигунах стала експлуатація в Харкові серійних таксомоторів "Волга" з гідридні баками для зберігання водню.

За даними Інституту проблем машинобудування НАН України застосування бензоводневого палива збільшує ККД двигуна на 10...15%, а на часткових режимах - на 17...22% [12]. Фахівці ВАЗ прогнозують збільшення ККД двигунів до 48% (в 1,4 рази) при повному навантаженні і до 30% (в 1,6 рази) при навантаженні 20% максимальної [10]. Підставою для цього є результати стендових випробувань двигуна «ВАЗ-2111» на бензоводневому паливі, що показали можливість підвищення його ККД вище, ніж ККД тихохідного ДВЗ з турбонаддувом, на сьогодні найбільш економічного двигуна.

2.3 Обґрунтування пропозиції використання малих домішок водню шляхом проведення теплового розрахунку робочих циклів

2.3.1 Метод Гриневецького - Мазінга

В даному дипломному проєкті буде розглядатися розрахунковий цикл, який базується на класичному методі теплового розрахунку, розробленого професором В. І. Гриневецьким в 1907 р. А після, радянські вчені Е. К. Мазінг, Н. Р. Брілінг, А. С. Орлін, Б. С. Стечкин розвинули цей метод стосовно до різних типів двигунів.

Метод теплового розрахунку заснований на загальновідомих положеннях термодинаміки і термохімії, досить повно охоплює сутність теплових явищ, що відбуваються в робочому циліндрі, і являє собою інженерне аналітичне дослідження. На його основі можна:

- кількісно оцінити ці явища як при проектуванні, так і при дослідженні побудованого двигуна;
- дати уявлення про основні параметри циклу і фактори, що впливають на робочі процеси циклу;
- визначити розрахункові значення параметрів стану робочого тіла у характерних точках розрахункового циклу, а також ефективні показники, що характеризують роботу двигуна в цілому.

Розрахунковий цикл поршневого ДВС значно відрізняється від ідеальних циклів. У розрахунковому циклі ДВЗ змінюються кількість робочого тіла, його склад і фізичні властивості. Внаслідок кінцевої швидкості згоряння і дисоціації продуктів згоряння, прихована в паливі хімічна енергія, виділяється не миттєво. У процесі розширення відбуваються догоряння палива і відновлення дисоційованих газів з виділенням теплоти. У розрахунковому циклі робоче тіло не можна приймати з постійними теплоємністю, так як температура і склад газів в циліндрі значно змінюються. У розрахунковому циклі є також теплові та аеродинамічні втрати.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						22
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Метод забезпечує задовільну для практики точність розрахунків, незважаючи на те, що цикл, який протікає в двигуні, описується найпростішими термодинамічними процесами і вводиться ряд опитних коефіцієнтів, що оцінюють реальні умови протікання робочих процесів у двигуні.

Розрахунковий цикл судових ДВЗ складається з п'яти послідовних процесів: наповнення, стиску, згорання палива, розширення і випуску.

Робочий процес двигуна складався з послідовного розрахунку п'ятих процесів, що відтворюються у циклі: наповнення, стиску, згорання палива, розширення та випуску.

Точність розрахунку вважалася задовільною, якщо різниця між заданою і отриманою в результаті розрахунку потужності не перевищувала 0,5%. Для двигунів, що мають вільний газотурбінний наддув, при розрахунку циклу двигуна необхідно забезпечити баланс потужності турбіни і компресора турбокомпресора.

Забезпечення необхідного балансу отримувалось шляхом підбору таких значень коефіцієнта надлишку повітря α і тиск повітря за компресором турбокомпресора P_k , при якому потужність газової турбіни була рівній потужності компресора, насадженого на загальний з турбіною вал турбокомпресора. При цьому різниця між підбраним і дійсним значенням P_k (отриманим в результаті розрахунку циклу) не перевищувала 0,5%. В якості прикладу, представимо повний розрахунок номінального режиму роботи двигуна.

2.3.2 Обґрунтування вибору вхідних параметрів робочого циклу двигуна

Температура навколишнього повітря T_0 . Приймаємо $T_0 = 293 \text{ K}$.

Тиск навколишнього повітря p_0 . В усіх випадках варто приймати $p_0 = 0,1013 \text{ МПа}$ (стандартні атмосферні умови).

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						23
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Ступінь стиску ε . При призначенні ступеня стиску варто враховувати розміри циліндра, тип двигуна, його швидкохідності і спосіб сумішоутворення. Приймаємо $\varepsilon = 15$.

Коефіцієнт надлишку повітря α . Цей коефіцієнт також залежить від розмірів циліндра і способу сумішоутворення. Приймаємо α дизельного двигуна 2,36.

Коефіцієнт залишкових газів γ_r . Вплив на значення цього коефіцієнту завдають тип двигуна, особливості повітропостачання і газообміну. Приймаємо $\gamma_r = 0,025$.

Коефіцієнт використання теплоти в точці z (ξ_z), та в точці b (ξ_b). Ця величина змінюється в широких межах і залежить від ступеня досконалості двигуна. Найкраще ці величини призначати після аналізу теплового балансу двигунів, близьких до проектного. Для цього двигуна коефіцієнти лежать у межах: $\xi_z = 0,8 \dots 0,92$; $\xi_b = 0,82 \dots 0,95$;

Приймаємо $\xi_z = 0,92$; $\xi_b = 0,95$.

Механічний ККД двигуна η_m . Механічний ККД оцінює механічні втрати двигуна, являє собою відношення корисної до використаної потужності. Значення механічного ККД двигуна залежить від якості масла, від теплового стану двигуна. Значення ккд для чотирьохтактних дизельних СОД η_m знаходиться у межах $0,85 \dots 0,95$. Приймаємо $\eta_m = 0,95$.

Зменшення тиску у повітроохолоджувачі $\Delta P_{ох}$. У числовому виразі $\Delta P_{ох} = 0,004$ МПа.

Температура залишкових газів T_r . Для двигунів такого типу T_r знаходиться у межах $700 \dots 1200$ К. Приймаємо $T_r = 800$ К.

Хімічний склад палива. Розрахунок проводиться на дизельне паливо середнього складу: $C = 0,87$ кг – кількість вуглецю;

$H = 0,126$ кг – кількість водню;

$S = 0$ кг – кількість сірки;

$O = 0,004$ кг – кількість кисню.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						24
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Коефіцієнт тактності Z – являє собою кількість робочих ходів поршня, що припадають на один оберт колінчастого вала, тоді для 4 – тактних двигунів $Z = 0,5$.

Нижча теплота згоряння палива. Приймаємо $Q_H = 42700$ (кДж/кг).

Ступінь підвищення тиску при згорянні λ . Приймаємо $\lambda = 1,2$.

Коефіцієнт округлення індикаторної діаграми ζ . Величину цього коефіцієнту вибирають на підставі дослідних даних, звертають увагу на тип двигуна та особливості системи газообміну. Для 4 – тактних двигунів $\zeta = (0,92 \dots 0,99)$. Приймаємо $\zeta = 0,99$.

Відношення тиску перед турбіною до тиску після компресора Ψ_T . У цьому двигуні $\Psi_T = 0,805$.

Підігрів заряду від стінок циліндру. Приймаємо $\Delta T = 15$ К.

Ступінь підвищення тиску МПа P_k . $P_k = 4,1$.

Адіабатний ККД компресору η_{ad} . Приймаємо $\eta_{ad} = 0,81$.

Адіабатний ККД турбіни η_{adT} . Приймаємо $\eta_{adT} = 0,82$.

Механічний ККД турбіни η_{mT} . Приймаємо $\eta_{mT} = 0,98$.

Діаметр циліндру: $D = 0,43$ м.

Хід поршня: $S = 0,61$ м.

Частота обертів колінчастого валу: $n = 500$ хв-1.

Число циліндрів: $I = 9$.

Ефективна потужність $N_e = 8100$ кВт.

2.3.3 Розрахунок робочого циклу

Розрахунок процесу наповнення

Температура повітря за компресором, К

$$T_k = T_0 \times \left[1 + \frac{\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{0,286} - 1}{\eta_{k.ad}} \right] = 293 \times \left[1 + \frac{\left(\frac{0,41}{0,101} \right)^{0,286} - 1}{0,81} \right] = 470,825$$

Температура повітря перед двигуном, К

$$T_s = T_k - \eta_o \times (T_k - T_0) = 470,825 - 0,8 \times (470,825 - 293) = 328,565$$

Температура заряду наприкінці процесу наповнення, К

$$T_a = \frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r \times T_r}{1 + \gamma_r} = \frac{328,565 + 15 + 0,025 \times 800}{1 + 0,025} = 354,698$$

Тиск повітря перед двигуном, МПа

$$P_s = P_k - \Delta P_{ox} = 0,41 - 0,004 = 0,406$$

Тиск заряду наприкінці процесу наповнення, МПа

$$P_a = 0,97 \times P_s = 0,97 \times 0,406 = 0,394$$

Коефіцієнт наповнення

$$\eta_n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \times \frac{P_a}{P_s} \times \frac{T_s}{T_a} \times \frac{1}{1 + \gamma_r} \times (1 - \varphi_n) = \frac{15}{15 - 1} \times \frac{0,394}{0,406} \times \frac{328,565}{354,698} \times \frac{1}{1 + 0,025} \times (1 - 0) = 0,939$$

Розрахунок процесу стиску

У реальному двигуні теплоємність заряду в циліндрі змінюється залежно від температури, тому що, відбувається теплообмін зі стінками циліндра. Так само на характер протікання процесу впливають витік газів через нещільності клапанів і поршневих кілець, дозарядка циліндра до закриття впускного клапана, випару палива, згоряння палива наприкінці стиску. У зв'язку із цим точний термодинамічний опис процесу стиску в реальному двигуні утруднено.

На практиці вважають, що процес стиску відбувається по політропі з показником n_1 величина якого забезпечує одержання такої ж роботи в процесі стиску, як і при змінному показнику у дійсному процесі.

При виборі величини n_1 , необхідно враховувати наступне: зі збільшенням частоти обертання колінчатого вала n_1 збільшується; при підвищенні середньої температури процесу стиску n_1 зменшується; зі зменшенням інтенсивності охолодження двигуна n_1 збільшується; зі зменшенням відносини поверхні охолодження до об'єму циліндра n_1 збільшується; для дизелів з нерозділеними камерами згоряння $n_1 = 1,32 \dots 1,42$, приймаємо в розрахунок:

$$n_1 = 1,361$$

Тиск в кінці процесу стиску, МПа

$$P_c = P_a \times \varepsilon^{n_1} = 0,394 \times 15^{1,361} = 15,702$$

Температура в кінці процесу стиску, К

$$T_c = T_a \times \varepsilon^{n_1-1} = 354,698 \times 15^{1,361-1} = 942,816$$

Розрахунок процесу згоряння

Дійсна кількість повітря для згоряння, кмоль/кг

$$L = \frac{\alpha}{0,21} \times \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) = \frac{2,36}{0,21} \times \left(\frac{0,87}{12} + \frac{0,126}{4} + \frac{0}{32} - \frac{0,004}{32} \right) = 1,167$$

Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta_0 = 1 + \frac{8 \times H + O}{32 \times L} = 1 + \frac{8 \times 0,126 + 0,004}{32 \times 1,167} = 1,027$$

Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} = \frac{1,027 + 0,025}{1 + 0,025} = 1,026$$

Доля палива, що згоріла в точці z

$$x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b} = \frac{0,92}{0,95} = 0,968$$

Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z

$$\beta_z = 1 + \left(\frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \times x_z = 1 + \left(\frac{1,027 - 1}{1 + 0,025} \right) \times 0,968 = 1,026$$

Максимальна температура згоряння, К

$$\frac{\xi_z \times Q_H}{\alpha \times L_0} + [c'_v + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times (c''_v + 8,314 \times \lambda)] \times T_c = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times c''_{pz} \times T_z$$

$$T_z = \frac{C}{A \times T_z + B}$$

$$A = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times b_z$$

$$B = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times (a_{vz} + 8,314)$$

$$C = \frac{\xi_z \times Q_H}{\alpha \times L_0} + [(19,26 + 0,0025 \times T_c) + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times ((20,47 + 0,0036 \times T_c) + 8,314 \times \lambda)] \times T_c$$

Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} = \frac{1,027 + 0,025}{1 + 0,025} = 1,026$$

Доля палива, що згоріла в точці z

$$x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b} = \frac{0,92}{0,95} = 0,968$$

Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z

$$\beta_z = 1 + \left(\frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \times x_z = 1 + \left(\frac{1,027 - 1}{1 + 0,025} \right) \times 0,968 = 1,026$$

Максимальна температура згоряння, К

$$\frac{\xi_z \times Q_H}{\alpha \times L_0} + [c'_v + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times (c''_v + 8,314 \times \lambda)] \times T_c = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times c''_{pz} \times T_z$$

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						28
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$T_z = \frac{C}{A \times T_z + B}$$

$$A = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times b_z$$

$$B = \beta_z \times (1 + \gamma_r) \times (a_{vz} + 8,314)$$

$$C = \frac{\xi_z \times Q_n}{\alpha \times L_0} + [(19,26 + 0,0025 \times T_c) + 8,314 \times \lambda + \gamma_r \times ((20,47 + 0,0036 \times T_c) + 8,314 \times \lambda)] \times T_c$$

Це рівняння розв'язується методом послідовних наближень, для чого у першому наближенні приймаємо $T_z = 1800$ К. Після вирішення декількох рівнянь отримуємо:

$$T_z = 1823$$

Максимальний тиск згоряння, МПа

$$P_z = \lambda \times P_c = 1,2 \times 15,702 = 18,843$$

Розрахунок процесу розширення

Ступінь попереднього розширення

$$\rho = \frac{\beta_z}{\lambda} \times \frac{T_z}{T_c} = \frac{1,026}{1,2} \times \frac{1823,359}{942,816} = 1,653$$

Ступінь подальшого розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{15}{1,653} = 9,075$$

Розрахунок параметрів процесу розширення ведеться з умовно постійним показником політропи розширення n_2 . Для дизелів $n_2 = 1,18 \dots 1,3$. Варто пам'ятати, що показник політропи залежить від режиму роботи двигуна, розмірів циліндра, способу охолодження й ряду інших факторів. У всіх випадках, коли збільшується тривалість догорання палива, знижуються відносний теплообмін і витоки газів, n_2 зменшується. Виходячи з вищесказаного прийmemo:

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						29
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$n_2 = 1,284$$

Температура в кінці процесу розширення, К

$$T_b = T_z \times \frac{1}{\delta^{n_2-1}} = 1823,359 \times \frac{1}{9,075^{1,284-1}} = 974,636$$

Тиск в кінці процесу розширення, МПа

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \frac{18,843}{9,075^{1,284}} = 1,11$$

Визначення індикаторних показників

Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа

$$P'_i = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \times \left[\lambda \times (\rho - 1) + \frac{\lambda \times \rho}{n_2 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{\delta^{n_2-1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1-1}} \right) \right] =$$

$$= \frac{15,702}{15 - 1} \times \left[1,2 \times (1,653 - 1) + \frac{1,2 \times 1,653}{1,284 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{9,073^{1,284-1}} \right) - \frac{1}{1,361 - 1} \times \left(1 - \frac{1}{15^{1,361-1}} \right) \right] = 2,587$$

Дійсний середній індикаторний тиск, МПа

$$P_i = P'_i \times \zeta \times (1 - \varphi_n) = 2,587 \times 0,99 \times (1 - 0) = 2,561$$

Індикаторна питома витрата пального, кг/(кВт*год)

$$g_i = 433 \times \frac{P_s \times \eta_n}{\alpha \times L_0 \times T_s \times P_i} = 433 \times \frac{0,406 \times 0,939}{2,36 \times 0,495 \times 328,565 \times 2,561} = 0,168$$

Індикаторний ККД

$$\eta_i = \frac{3600}{g_i \times Q_n} = \frac{3600}{0,168 \times 42700} = 0,502$$

Визначення ефективних показників

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						30
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Середній ефективний тиск, МПа

$$P_e = P_i \times \eta_m = 2,561 \times 0,95 = 2,433$$

Ефективний ККД двигуна

$$\eta_e = \eta_i \times \eta_m = 0,502 \times 0,95 = 0,477$$

Питома ефективна витрата пального, кг/(кВт*год)

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} = \frac{0,168}{0,95} = 0,177$$

Ефективна потужність двигуна

$$N_e = 13,1 \times D_c^2 \times S_c \times z \times P_e \times n \times i = 13,1 \times 0,43^2 \times 0,61 \times 0,5 \times 2,433 \times 500 \times 9 = 8087,46$$

Порівняння заданої та отриманої потужності двигуна

$$\Delta N = \frac{N_e - N'_e}{N_e} \times 100\% = \frac{8087,46 - 8100}{8087,46} = -0,16\%$$

Точність розрахунку задовільна, різниця між заданою і отриманою в результаті розрахунку потужності не перевищує 0,5%.

Визначення дійсного P_k компресора на даному режимі роботи двигуна

Витрата повітря через компресор, кг/с

Універсальна газова стала $R = 287$ Дж/кг*К

$$G = \left(\frac{\pi \times D_c^2}{4} \right) \times S_c \times \left(\frac{P_s \times 10^6}{R \times T_s} \right) \times \eta_i \times i \times z \times \left(\frac{n}{60} \right) \times \phi_a =$$
$$= \frac{3,14 \times 0,43^2}{4} \times 0,61 \times \frac{0,406 \times 10^6}{287 \times 328,565} \times 0,939 \times 9 \times 0,5 \times \frac{500}{60} \times 1 = 13,443$$

Витрата газів через турбіну, кг/с

$$G_t = G + g_e \times \frac{N_e}{3600} = 13,443 + 0,177 \times \frac{8087,46}{3600} = 10,757$$

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						31
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Тиск газу перед турбіною, МПа

$$P_r = \psi_t \times P_k = 0,805 \times 0,41 = 0,33$$

Температура газу перед турбіною, К

$$T_t = T_b \times \left(\frac{P_r}{P_b} \right)^{\frac{n_2-1}{n_2}} = 974,636 \times \left(\frac{0,33}{1,11} \right)^{\frac{1,284-1}{1,284}} = 745,332$$

Загальна кількість продуктів згоряння, кмоль

$$M_s = \left(\frac{C}{12} \right) + \left(\frac{H}{2} \right) + [0,21 \times (\alpha - 1) \times L_0] + (0,79 \times \alpha \times L_0) =$$

$$= \left(\frac{0,87}{12} \right) + \left(\frac{0,126}{2} \right) + [0,21 \times (2,36 - 1) \times 0,495] + (0,79 \times 2,36 \times 0,495) = 1,2$$

Універсальна газова стала для відпрацьованих газів, кДж/кг*К

$$R_t = \frac{1}{\frac{C}{12 \times M_s \times 189} + \frac{H}{2 \times M_s \times 461,6} + \frac{0,21 \times (\alpha - 1) \times L_0}{M_s \times 259,8} + \frac{0,79 \times \alpha \times L_0}{M_s \times 296,8}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{0,87}{12 \times 1,2 \times 189} + \frac{0,126}{2 \times 1,2 \times 461,6} + \frac{0,21 \times (2,36 - 1) \times 0,495}{1,2 \times 259,8} + \frac{0,79 \times 2,36 \times 0,495}{1,2 \times 296,8}} = 287,457$$

Показник адіабати розширення газу в турбіні

$$k_t = \frac{(a_{vb} + b_b \times T_t) + 8,314}{a_{vb} + b_b \times T_t} = \frac{(19,791 + 0,003 \times 745,332) + 8,314}{19,791 + 0,003 \times 745,332} = 1,377$$

Дійсна ступінь підвищення тиску в компресорі

$$\Pi_k = \left[1 + \frac{\left(\frac{k_t}{k_t - 1} \right) \times R_t \times T_t \times \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{P_r}{P_0} \right)^{\frac{k_t-1}{k_t}}} \right] \times \eta_{t.m} \times \eta_{t.ad} \times G_t}{G \times R \times T_0 \times \left(\frac{k_s}{k_s - 1} \right) \times \frac{1}{\eta_{k.ad}}} \right]^{\frac{1}{0,286}} =$$

$$= \left[1 + \frac{\left(\frac{1,377}{1,377-1} \right) \times 287,457 \times 745,332 \times \left[1 - \frac{1}{\left(\frac{0,33}{0,101} \right)^{\frac{1,377-1}{1,377}}} \right] \times 0,98 \times 0,82 \times 10,757}{10,448 \times 287 \times 293 \times \left(\frac{1,4}{1,4-1} \right) \times \frac{1}{0,81}} \right]^{\frac{1}{0,286}} = 4,054$$

$$P_{kd} = P_{\kappa} \times P_0 = 4,054 \times 0,101 = 0,411$$

Порівняння заданого та отриманого тиску надуву

$$\Delta P_k = \frac{P_{kd} - P_k}{P_{kd}} \times 100\% = \frac{0,411 - 0,41}{0,411} = 0,15\%$$

Точність розрахунку задовільна, різниця між заданим і отриманим в результаті розрахунку тиском надуву не перевищує 0,5%.

Результати теплового розрахунку двигуна на дизельному паливі при навантаженнях 50% та 25% представлені в табл. 2.1.

Розрахунок проводиться з використанням програмами, написаній у середовищі Mathcad. Розрахунок номінального режиму дозволить налаштувати програму на даний двигун, оскільки більшість параметрів нашого двигуна наведено заводом-виробником саме для номінального режиму.

Розрахований номінальний режим є базою для розрахунку часткових режимів роботи двигуна. Крім того, для розрахунків часткових режимів необхідно знати характеристику, за якою працює двигун.

Таблиця 2.1 – Розрахунок робочих процесів двигуна

Параметр	Відносні потужність, %		
	25	50	100
Температура повітря за компресором, T_k (К)	337,1	391,4	470,8
Температура повітря перед двигуном, T_s (К)	310,6	312,7	328,6
Температура заряду к кінцю наповнення, T_a (К)	337,2	339,2	354,7
Тиск повітря перед двигуном, P_s (МПа)	0,149	0,233	0,406
Тиск заряду к кінцю наповнення, P_a (МПа)	0,145	0,226	0,394
Коефіцієнт наповнення, η_n	0,934	0,935	0,939
Середній показник політропи стиску, n_1	1,363	1,363	1,361
Тиск в кінці процесу стиску, P_c (МПа)	5,798	9,059	15,696
Температура в кінці процесу стиску, T_c (К)	901,8	906,4	942,4
Максимальна температура згоряння, T_z (К)	1671,7	1737,7	1823,0
Максимальний тиск згоряння, P_z (МПа)	6,958	10,871	18,835
Ступінь попереднього розширення, $\square_o$	1,578	1,635	1,653
Ступінь наступного розширення, $\square$	9,505	9,172	9,073
Середній показник політропи розширення, n_2	1,296	1,29	1,284
Температура в кінці процесу розширення, T_b (К)	858,4	913,7	974,6
Тиск в кінці процесу розширення, P_b (МПа)	0,376	0,623	1,11
Теоретичний середній індикаторний тиск, P_t (МПа)	0,863	1,454	2,587
Дійсний середній індикаторний тиск, P_i (МПа)	0,845	1,425	2,561
Індикаторна питома витрата палива, g_i (кг/кВт*ч)	0,166	0,168	0,168
Індикаторний ККД, η_i	0,509	0,503	0,502
Середній ефективний тиск, P_e (МПа)	0,693	1,282	2,433
Ефективна витрата палива, g_e (кг/кВт*ч)	0,202	0,186	0,177
Ефективний ККД, η_e	0,417	0,452	0,477
Ефективна потужність, N_e (кВт)	2027,8	4049,7	8087,5

Як відомо, характеристика роботи двигуна визначається споживачем потужності, на який працює двигун. В якості споживачів в даному випадку виступає гребний гвинт регульованого шагу судна. Тобто частота обертання залишається незмінною.

2.3.4 Розрахунок двигуна на часткових режимах

Подальший розрахунок проводиться за тією ж схемою, що і розрахунок номінального режиму роботи, проте перш необхідно визначити, як змінюватимуться вихідні параметри для розрахунку циклу, які були взяті за вихідні для номінального режиму. Очевидно, що серед них можна виділити не мінливі від режиму до режиму параметри, а саме:

1. число циліндрів - i ;
2. діаметр циліндра - D ;
3. хід поршня - S ;
4. тактність двигуна - z ;
5. тиск навколишнього середовища - P_0 ;
6. температура навколишнього середовища - T_0 ;
7. ступінь стиску - ϵ ;
8. частота обертання колінчатого валу, n

Крім того, частина параметрів умовно можна прийняти постійними від режиму до режиму внаслідок їх незначного впливу на цикл. До таких параметрів можна віднести:

1. показник політропи стиску у компресорі турбокомпресора – n_k ;
2. підігрів заряду від стінок циліндру - ΔT_a ;
3. коефіцієнт округлення індикаторної діаграми - ζ ;
4. коефіцієнт продувки - ϕ_a ;
5. коефіцієнт залишкових газів – γ_r ;
6. температура газів, що залишилися – T_r ;
7. ступінь підвищення тиску при згорянні – λ ;
8. механічний КПД турбокомпресора – η_m^{tk} ;
9. КПД охолоджувача повітря - η_o .

Інші параметри потребують коректного визначення їх зміни по відношенню до їх значення на номінальному режимі роботи двигуна.

Визначення значень цих параметрів, послідовно для кожного з них, проводиться по наступним залежностям.

Механічний ККД двигуна η_m визначається так:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_i} = \frac{N_e}{N_e + \Delta N_m} = \frac{P_e}{P_e + P_m}$$

де N_i - індикаторна потужність двигуна; ΔN_m - потужність механічних втрат в двигуні; P_e - середній ефективний тиск; P_m - середній тиск механічних втрат.

З достатньою точністю зміна середнього тиску механічних втрат, обумовленого в основному тертям, описується залежністю:

$$P_m = a + b c_m$$

де a и b – експериментальні коефіцієнти ($a = 0,088...0,103$, $b = 0,0118...0,0135$);

c_m – середня швидкість поршня

$$c_m = \frac{S n}{30}$$

Вважаючи сталу механічних втрат рівною $a = 0.1$, а також виходячи з відомого значення механічного ККД двигуна на номінальному режим η_{mn} отримаємо:

$$P_{mn} = P_{en} \frac{(1 - \eta_{mn})}{\eta_{mn}}$$

$$b = \frac{\Delta P_{mn} - a}{c_{mn}}$$

де P_e - середній ефективний тиск, отриманий за результатами розрахунку номінального режиму двигуна.

Знаючи значення a і b можна визначити середній тиск механічних втрат для будь-якого режиму роботи двигуна, а значить і потужність механічних втрат ΔN_m за такою залежністю:

$$\Delta N_m = 1000 \frac{P_m i z V_s n}{60}$$

Значення механічного ККД на довільному режимі роботи визначимо по вихідній залежності, знаючи ефективну потужність двигуна з характеристики споживача:

$$\eta_m = \frac{N_e}{N_e + \Delta N_m}$$

Температура повітря за компресором турбокомпресора T_k визначається за підбирається значенню тиску повітря за компресором P_k по залежності:

$$T_k = T_0 \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{n_k - 1}{n_k}}$$

де n_k - показник політропи стиснення в компресорі турбокомпресора.

Зниження температури повітря $\Delta T_{охл}$ в охолоджувачі надувочного повітря визначається так:

де $\eta_{co} = 0,8$ - ККД с: $\Delta T_{охл} = \eta_{co} (T_k - T_0)$ кення двигуна, який приймається постійним на всіх режимах.

Залежність адиабатного ККД компресора турбокомпресора η_{adk} від витрати повітря двигуном може бути визначена за такою залежністю, яка є апроксимацією експериментальних даних. В якості апроксимуючої функції використовувалася парабола 2-го ступеня:

$$\bar{\eta}_{adk} = -0.25(\bar{G} - 1)^2 + 1$$

де $\bar{\eta}_{adk} = \eta_{adk} / \eta_{adkn}$ - відносний адиабатний ККД компресора; $\bar{G}$ - відносна витрата повітря через турбокомпресор.

Витрата повітря визначається так:

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						37
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$G = \eta_n \rho_s \phi_a \frac{izV_s n}{60}$$

де η_n – коефіцієнт наповнення;

ρ_s – щільність повітря в ресивері двигуна.

$$\rho_s = \frac{P_s}{RT_s} = \frac{P_k - \Delta P_{охл}}{R(T_k - \Delta T_{охл})}$$

Припускаючи що η_n и ϕ_a умовно постійні, можна записати:

$$\frac{G}{G_n} = \bar{G} = \bar{\rho}_s \bar{n}$$

Тоді:

$$\bar{\eta}_{a\partial k} = -0.25(\bar{\rho}_s \bar{n} - 1)^2 + 1$$

Адіабатні ККД турбіни турбокомпресора надт визначається схожим чином як відношення дійсної роботи турбіни до роботи турбіни без теплообміну і втрат на тертя (адіабатної роботи):

$$\eta_{a\partial t} = \frac{L_{\partial}}{L_{a\partial t}}$$

Для визначення значення адиабатного ККД турбіни на дрібних режимах застосуємо наступну залежність:

$$\bar{\eta}_{a\partial t} = -0.25(\bar{\rho}_s \bar{n} - 1)^2 + 1$$

Падіння тиску повітря на ОНВ $\Delta P_{охл}$ визначається з припущення, що повітряний опір пропорційно квадрату швидкості потоку w .

Рівняння витрати рідини (газу):

$$G = \rho w f$$

де ρ - густина рідини; w - швидкість течії рідини;
 f - площа перерізу каналу, по якому тече рідина.

Тоді можна записати:

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						38
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

$$\Delta P_{охл} = \Delta P_{охлн} \left(\frac{w}{w_n} \right)^2 = \Delta P_{охлн} \left(\frac{\overline{G}}{\overline{\rho_s}} \right)^2 = \Delta P_{охлн} \left(\frac{\overline{\rho_s} \overline{n}}{\overline{\rho_s}} \right)^2 = \Delta P_{охлн} \overline{n}^{-2}$$

Опір ОНВ на номінальному режимі роботи двигуна згідно вимогам ГОСТу не повинно перевищувати $\Delta P_{охлн} < 0.005$ МПа.

Відношення тиску газів перед турбіною до тиску повітря за компресором P_t / P_k на різних режимах не залишається

Характер цієї зміни буде залежати від схеми газовипускних систем. Спрощуючи, прийmemo, що ставлення P_t / P_k пропорційно відносної потужності двигуна. Тоді, апроксимуючи експериментальні дані, можна записати:

$$\overline{\psi}_t = \left(\frac{P_t}{P_k} \right) = 0.2(1 - \overline{N}_e) + 1$$

Тиск повітря за компресором P_k і коефіцієнт надлишку повітря α підбираються аналогічним чином, як і у випадку підбору цих параметрів при розрахунку номінального режиму двигуна. Однак, для попередньої оцінки, можна отримати взаємозв'язок цих параметрів один від одного на наступній основі.

Індикаторна потужність двигуна може бути визначена за формулою, запропонованою Б. Стечкиним:

$$N_i = V_{sиз} \frac{Q_e}{L'_0} \frac{n}{60} \frac{\eta_i}{\alpha} \rho_s \eta_n$$

Спираючись на цю залежність, можна записати:

$$\overline{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_n} = \frac{\overline{\eta}_n \overline{\eta}_i \overline{\rho_s} \overline{n}}{\overline{N}_i}$$

Далі, приймаючи коефіцієнт наповнення η_n постійним (що фактично відповідає дійсності), а також беручи постійним індикаторний ККД η_i (що насправді не відповідає, тому індикаторний ККД залежить від коефіцієнта надлишку повітря), запишемо залежність, що дозволяє приблизно визначити

коефіцієнт надлишку повітря в залежно від вибраного значення тиску повітря за компресором:

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha}{\alpha_n} = \frac{\bar{\rho}_s \bar{n}}{N_i}$$

Такі залежності дозволяють отримати значення P_k і α в першому наближенні, потім необхідно уточнювати значення цих параметрів для досягнення балансу закладених і отриманих величин.

Розраховувавши змінні параметри, проводимо розрахунок часткових режимів по тому ж алгоритму, що і на номінальному режимі. Розрахунок проводиться по методу Гриневецького-Мазінга, у програмному комплексі Matchcad. Результати розрахунку зводимо до таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку змінних вхідних параметрів

№ Режиму	Відносна потужність, %	Ефективна потужність	Механічний ККД двигуна	Відношення тиску перед турбіною до тиску після компресора	Адіабатний ККД компресора	Адіабатний ККД турбіни	Ступінь підвищення тиску в
1	100	8100	0,95	0,81	0,81	0,82	4,1
2	50	4050	0,9	0,84	0,80	0,81	2,35
3	25	2025	0,82	0,91	0,79	0,80	1,5

2.3.5 Тепловий розрахунок робочих процесів двигуна при додаванні малих домішок водню

Для розрахунку робочих процесів двигуна, що працює з малими добавками водневого палива, необхідно провести попередній розрахунок нижчої теплоти згорання суміші палив, і розрахувати процентне співвідношення компонентів. Нижча теплота згорання суміші дизельного палива і водню розраховується за формулою:

$$Q_H^{cm} = \omega_m^D Q_H^D + \omega_m^H Q_H^H$$

де Q_H^{cm} – нижча теплота згоряння суміші палив, Q_H^D – нижча теплота згоряння дизельного палива, Q_H^H – нижча теплота згоряння водневого палива, ω_m^D – масова концентрація дизельного палива, ω_m^H – масова концентрація водневого палива. Також скористаємося допущенням про те, що вміст водню в суміші палив збільшується за рахунок зменшення вмісту вуглецю. Розрахунок нижчої теплоти згоряння та масового елементарного складу наведено в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 - Властивості суміші палив

Параметр		Масовий елементарний склад палива, %		Масовий склад палива, %		Суміш
		Дизельне паливо	Водень	Дизельное топливо	Водород	
Компоненти, %	C	87	0	99,5	0,5	86,57
	H	12,6	100			13,04
	O	0,4	0			0,40
Нижча теплота згоряння, кДж/кг		42700	120000	99,5	0,5	43087

Як було описано вище, змінюється не тільки енергетичний склад палива, а перш за все характер сумішоутворення та згоряння палива. Це складні процеси, які важко описати. У математичній моделі Гріневецького-Мазінга, яка використовується для розрахунку робочих процесів двигуна у цьому дипломному проєкті, цей вплив можна врахувати, підвищуючи коефіцієнти використання теплоти ξ_z та ξ_b . Ці коефіцієнти описують ступінь досконалості двигуна і, так як машина 9М43 сучасна, досягають відносно великих значень $\xi_z = 0,92$; $\xi_b = 0,95$. Та оскільки додавання водню

призводить до покращення використання теплоти, значення цих параметрів зросте ξ_z до 0,95, ξ_b до 0,98.

Таблиця 2.4 – Результат розрахунку робочих процесів двигуна

Параметр	Відносна потужність, %	
	25	50
Температура повітря за компресором, T_k (К)	337,1	391,4
Температура повітря перед двигуном, T_s (К)	310,6	312,7
Температура заряду к кінцю наповнення, T_a (К)	337,2	339,2
Тиск повітря перед двигуном, P_s (МПа)	0,149	0,233
Тиск заряду к кінцю наповнення, P_a (МПа)	0,145	0,226
Коефіцієнт наповнення, η_n	0,934	0,935
Середній показник політропи стиску, n_1	1,363	1,363
Тиск в кінці процесу стиску, P_c (МПа)	5,798	9,059
Температура в кінці процесу стиску, T_c (К)	901,8	906,4
Максимальна температура згоряння, T_z (К)	1673,6	1742,3
Максимальний тиск згоряння, P_z (МПа)	6,958	10,872
Ступінь попереднього розширення, $\square_o$	1,579	1,639
Ступінь наступного розширення, $\square$	9,498	9,150
Середній показник політропи розширення, n_2	1,297	1,291
Температура в кінці процесу розширення, T_b (К)	857,6	915,1
Тиск в кінці процесу розширення, P_b (МПа)	0,375	0,624
Теоретичний середній індикаторний тиск, P_t (МПа)	0,863	1,459
Дійсний середній індикаторний тиск, P_i (МПа)	0,845	1,429
Індикаторна питома витрата палива, g_i (кг/кВт*ч)	0,159	0,161
Індикаторний ККД, η_i	0,526	0,519
Середній ефективний тиск, P_e (МПа)	0,693	1,286
Ефективна витрата палива, g_e (кг/кВт*ч)	0,194	0,179
Ефективний ККД, η_e	0,431	0,467
Ефективна потужність, N_e (кВт)	2028,1	4063,0

Врахувавши зміну складу палива, енергетики палива та використання тепла у двигуні, проведемо розрахунок робочих процесів двигуна на часткових режимах. Для порівняння витрати палива, будемо вважати що двигун працює в однакових умовах, тобто такі параметри як потужність та частота обертання колінчатого валу залишились незмінними. При порівнянні

результатів розрахунку режимів часткових навантажень при роботі на дизельному паливі, та при додаванні 0,5% водню (за масою), бачимо що розрахункові параметри робочих процесів двигуна лишились майже незмінними. Проте середня ефективна витрата палива знижується на 3...4%.

Слід також додати, що математична модель, яка використовується у цьому дипломному проєкті, не враховує кількість шкідливих викидів у відпрацьованих газах двигуна, насамперед оксидів азоту. Згідно публікацій цей параметр повинен зменшуватись на 4...6%.

По результатам розрахунку будуємо залежність витрати палива з домішками водню та без нього.

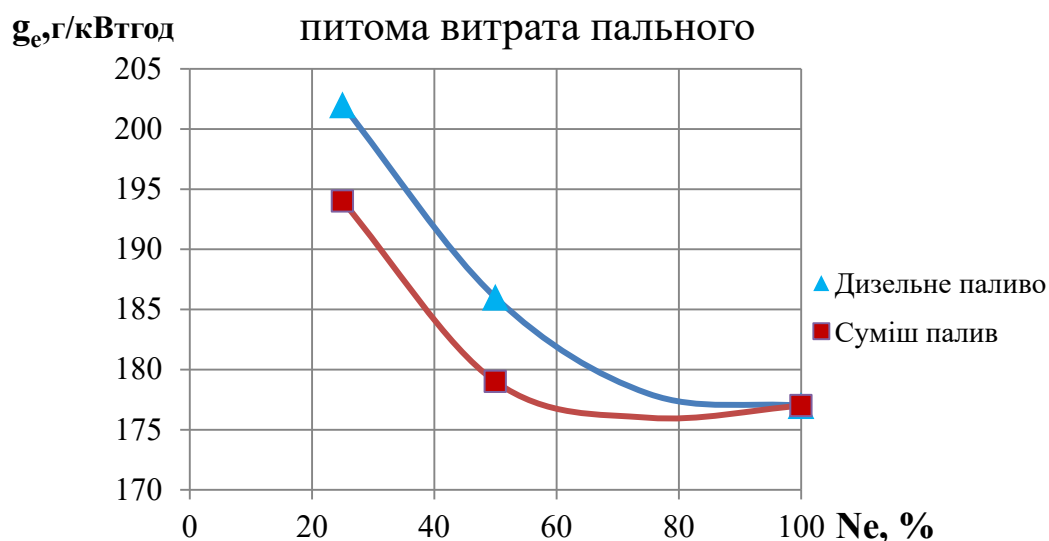


Рисунок 2.3 – Питома ефективна витрата палива

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ З ПЕРЕРОБКИ ПАЛИВНОЇ СИСТЕМИ ДВИГУНА

3.1 Способи виробництва водню

До теперішнього часу технології великомасштабного виробництва і переробки водню добре освоєні. Більшу частину водню отримують парової конверсією, або частковим окисленням вуглеводневої сировини, головним чином природного газу (рис. 3.1). Слід зазначити, що тільки 62% водню виробляють як цільовий продукт, решта 38% є побічним продуктом інших виробництв (нафтопереробка, коксохімія і т.п.). До останніх також відноситься майже весь електролітичний водень, одержуваний в даний час у виробництві хлору і каустичної соди.



Рисунок 3.1 - Структура світового виробництва водню

Основним споживачем водню як палива є космонавтика. Комбінація «рідкий водень (паливо) - рідкий кисень (окислювач)» забезпечує максимальне виділення енергії на одиницю ваги, що є визначальним критерієм для аерокосмічних додатків.

Слід зазначити, що зі значного обсягу виробленого водню тільки 5% в даний час є комерційним продуктом. Як правило, великі споживачі водню самі виробляють його для власних потреб, що викликано економічними чинниками (високі ціни на товарний водень), а також технічними труднощами зберігання і транспортування великих кількостей водню.

Удосконалення водневих технологій зв'язано з рішенням трьох груп проблем, пов'язаних з розробкою ефективних, економічно вигідних та безпечних процесів і обладнання для виробництва, використання, а також компактного зберігання водню. Відповідні роботи в області водневих технологій розвиваються переважно за цими трьома напрямками.

Існуючі способи виробництва водню базуються на використанні в якості вихідної сировини води (електроліз, фотоліз і радіоліз), вугілля і природного газу (парова і парокиснева конверсія), сірководню (хімічне та плазмохімічне розкладання) і деяких інших речовин. Основний напрямок вдосконалення всіх процесів виробництва водню полягає в збільшенні їх ефективності, зменшенні капітальних витрат і експлуатаційних витрат, збільшенні надійності та технологічної гнучкості.

Отримання водню з природних органічних палив в даний час найбільш широко освоєно. Основною технологією є парова конверсія метану. Як видно з даних рис. 3.1, по вказаній технології отримують близько 85% водню, що вироблено в світі, що обумовлено досить високою (більш 80%) ефективністю процесу, прийнятною вартістю і налагодженою інфраструктурою транспортування вихідної сировини. Вартість водню для даної технології виявляється найнижчою порівняно з іншими методами і істотно знижується в міру збільшення продуктивності

Основним недоліком отримання водню з природного газу є залежність від поставок сировини, запаси якого розподілені всього між кількома регіонами світу (Близький Схід - 40,8%, Росія - 26,7%, Іран - 15,2%, Катар - 14,7%). Серйозну проблему становлять і викиди в атмосферу великих

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						45
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

кількостей CO_2 , утилізація котрого вимагає значних капітальних витрат і експлуатаційних витрат, що істотно підвищує вартість кінцевого продукту. Крім цього, метод парової конверсії метану погано адаптується для малої продуктивності для децентралізованого виробництва водню (наприклад, заправочних станцій, автономних енергосистем і т.п.). Ще одним недоліком методу є наявність у водні домішок оксидів вуглецю, що висуває додаткові вимоги до його очищення.

З наведених причин конверсія метану зазвичай розглядається як перехідна технологія від інфраструктури що вклалася, до енергоринку водневої економіки майбутнього. У перспективі технології виробництва водню з органічних палив (природного газу, вугілля, нафтопродуктів, біомаси тощо), мабуть, будуть витіснятися іншими.

Слід зазначити, що з точки зору екології стратегія виробництва водню з природного палива мало чим відрізняється від їх безпосереднього спалювання. Якщо в останньому випадку шкідливі викиди в атмосферу з'являються на стадії використання палива, то в першому ми маємо практично ті ж викиди, але на стадії отримання водню. Тому основними компонентами нових технологій виробництва водню з вуглеводнів є процеси уловлювання супутніх газів, в першу чергу CO_2 . В якості прикладу можна навести останні розробки по парової конверсії вугілля. Крім цього, важливим непрямим фактором тут є підвищення ефективності використання палива. Водневі енергетичні технології володіють в цьому відношенні рядом переваг у порівнянні зі спалюванням копалин горючих.

Електроліз води є найбільш перспективною технологією одержання водню в майбутньому, хоча в даний час через високу вартість електроенергії частка цього методу у світовому виробництві водню не перевищує 5% (рис. 3.1). Найбільш привабливими особливостями електролізу води є екологічна чистота (за умови, що виробництво первинної енергії не пов'язане з забрудненням навколишнього середовища), можливість створення установок

з широким діапазоном продуктивності (від декількох літрів до сотень м³ водню на годину) , простота експлуатації і зручність в роботі, висока чистота виробленого водню і наявність цінного і екологічно чистого побічного продукту - газоподібного кисню.

В даний час існують три способи електролітичного виробництва водню, які відрізняються типом електроліту і умовами проведення електролізу. Основний внесок у вартість електролітичного водню (70-90%) вносять витрати на електроенергію. На відміну від розглянутого методу отримання водню з природного газу, із зростанням продуктивності електролізної установки ціна водню істотно знижуватися не буде, і основним чинником, що визначає конкурентоспроможності електролізера, буде не вартість, а ефективність його роботи (ккд). У той же час, при наявності дешевої електроенергії (наприклад, в «провальні» періоди її споживання) електролітичне отримання водню може стати рентабельним.

Інші методи виробництва водню в даний час знаходяться на стадії технологічних розробок. До них, зокрема, можна віднести наступні.

Розщеплення води на основі термохімічних циклів з використанням теплової енергії ($T \sim 800^{\circ}C$) від ядерних реакторів або геліоустановок. Досить докладний огляд даних методів за станом на середину 1980-х рр.. наводиться в довідниках.

Біохімічне розщеплення води (фотосинтез) з використанням спеціально виведених типів водоростей і мікроорганізмів.

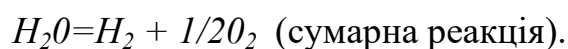
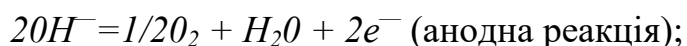
Фотокаталітичне розщеплення води на основі напівпровідникових матеріалів (змішані оксиди, сульфіді і селеніди, нітриди і оксинитрида).

Виробництво енергоакумуючих речовин (сплави кремнію і алюмінію) з наступною генерацією з них водню при розкладанні водою на місці споживання.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						47
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

3.2 Отримання водню електролізом води

Якщо створити у водному розчині електроліту, куди занурені два електроди, постійне електричне напруга, яка перевищує напругу розкладання води, то в ланцюзі з'явиться струм і на аноді почне виділятися кисень, а на катоді - водень, в об'ємному відношенні 1: 2. При цьому будуть відбуватися наступні реакції (у лужному середовищі):



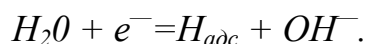
Питома електропровідність очищеної води незначна: при 18 °C вона складає $(2 - 6) \times 10^6 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$. Тому електролізу піддають водні розчини сильних кислот або лугів. Інші електроліти звичайно не використовують, оскільки вони самі розкладаються при електролізі і дають небажані побічні продукти. Зважаючи на істотні корозійні проблеми, що виникають при електролізі кислот, в даний час майже всі електролізери використовують водні розчини гідроксидів калію і натрію концентрацією 350-400 г/л. Розчини КОН мають переваги перед NaOH в силу більшої провідності K^+ проти іона Na^+ . Рівноважний склад пари над водним розчином КОН нижче, а це означає, що в кінцевих продуктах електролізу H_2 і O_2 міститься менше водяної пари. Концентрація КОН відповідає оптимальним значенням густин струму. Невеликі домішки до КОН не є перешкодою до його використання.

Типові характеристики сучасних лужних електролізерів наведені в табл. 3.1-3.2.

Зазначено вище катодна і анодна реакції є стадійність, причому їх механізм залежить від матеріалу електрода, складу розчину, а також величини перенапруги, температури та інших факторів.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						48
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

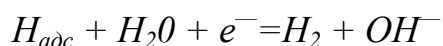
Один із ймовірних механізмів катодного виділення водню з лужних розчинів полягає в наступному. На першій стадії відбувається розряд молекул води з утворенням адсорбованих на електроді атомів водню:



Таблиця 3.1 – Технічні показники електролізерів

Тип електролізера	Напруга на комірці	Витрата електроенергії на 1 м ³ H ₂ , кВтгод	Загальний ККД електролізера, %
ФВ – 500	2,2	5,3	55
СЄУ – 20	2,05	4,9	60
Demag	2,05	4,9	60
De Nora	2,0	4,9	60
Loneza	1,8	4,8	70

Далі відбувається реакція так званої електрохімічної десорбції (реакція Гейровського):

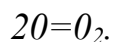
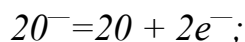
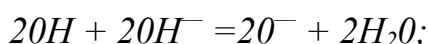


У сумі ці два процеси дають катодну реакцію виділення водню.

На аноді вірогідною першою стадією є розряд гідроксил - іонів з утворенням радикалів ОН:



Потім відбувається цеп процесів:



Запропоновані й інші схеми сумарного процесу, наприклад з участю металу електрода.

Найбільш вживаним електролітом в сучасних промислових електролізерах є 25-30%-ний КОН. Кислі електроліти дають хороший вихід з H₂, однак вони ставлять дуже важкі проблеми у виборі матеріалів, що протистоять корозії в сірчаній кислоті.

Електроди в даний час виготовляють найчастіше з вуглецевої сталі; аноди при цьому покривають нікелем, а катоди активують шляхом нанесення на їх поверхню або сірковмісного нікелю, або металу групи платини.

Луг, що міститься в розчині, як видно з наведених рівнянь, не бере участь в розряді, а служить тільки для перенесення іонів. Її витрата (2...3 г на 1 м³ водню при нормальних умовах) обумовлений віднесенням з продуктами електролізу. У електроліт вводять додатково $K_2Cr_2O_7$ (2...3 г/дм³); це дозволяє зменшити корозію сталевих деталей електролізера.

Сумарний процес розкладання води електролізом є процесом, зворотним горінню водню. Тому теоретична величина енергії, яка потрібна на одиницю кількості виробленого водню, дорівнює теплоті згоряння водню. Кожна молекула водню утворюється при приєднанні двох електронів до двох іонам водню в розчині, так що існує прямий зв'язок між струмом, що протікає, та швидкістю виробництва водню.

Витрата електроенергії і води при електролізі. Витрата електроенергії визначається добутком кількості витраченого електрики на напругу, прикладена до шин електролізера:

$$We = Uq$$

де We - витрата електроенергії, Вт год; U - напруга, В; q - кількість електрики, Кл.

На отримання 1 м³ H_2 та 0,5 м³ O_2 при нормальних умовах при теоретичній рівноважній напрузі розкладання води 1,23 В витрата електроенергії складе

$$We = 1,23 * (2 * 2,68) / 0,0224 = 2,95 \text{ кВт} \cdot \text{год},$$

де 2,68 - число Фарадея, виражене в ампергодинах на моль;

2 - число Фарадей, витрачених на виділення 1 моль H_2 ;

0,0224 - обсяг 1 моль водню при нормальних умовах.

При термонеутральній напрузі 1,48 В споживається 3,54 кВт-год на 1 м³ водню. Реальний витрата електроенергії на сучасних електролізерах

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						50
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

становить 4,0-4,5 і до 5,5 кВт-год на 1 м³ H₂. Для отримання 1 м³ водню та 0,5 м³ кисню при нормальних умовах необхідно витратити теоретично 805 г води. Практично витрата води складає 820-850 м.

Щільність струму, перенапряга, матеріали електродів і діафрагм в процесі електролізу води. Щільність струму, що протікає через осередок, визначає швидкість виділення водню на одиницю поверхні електрода і, таким чином, є важливим чинником у визначенні питомої вартості обладнання для даної швидкості отримання водню. І ефективність, і питома вартість можуть змінюватися при простій зміні експлуатаційних параметрів осередку. Таким чином, є ряд характеристик - чинна напруга (ефективність), швидкість виділення водню (струм) і капіталовкладення, які залежать від індивідуальної вольт-амперної характеристики даного типу електролізера.

Як було показано вище, теоретичне напруга розкладання води, обчислена з термодинамічних даних, дорівнює 1,23 В при атмосферному тиску і температурі 25 ° С. Напруга вище теоретичного необхідно, щоб реакція протікала з помітною швидкістю. Ця величина «надлишкового» напруги в порівнянні з теоретичним напругою розкладання зазвичай називається перенапругою.

Загальне перенапруження складається з наступних частин:

- омичне падіння напруги в електроліті і діафрагмі;
- падіння напруги на електродах і контактах;
- перенапруження виділення водню і кисню на електродах;
- концентраційна поляризація.
- омичне падіння напруги визначається рівнянням

$$\Delta\varphi_{ом} = IR$$

де $\Delta\varphi_{ом}$ - опір електроліту і діафрагми; I - струм. Пов'язані з цим витрати електроенергії дорівнюють

$$\Delta W_{ом} = I^2 R$$

і виділяються в процесі у вигляді тепла.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						51
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розвиток техніки електролізу пов'язано зі зниженням омичних втрат, наприклад шляхом підвищення температури процесу, використання відповідних діафрагм, електролітів з високою провідністю, зменшення відстані між електродами.

Зменшення падіння напруги на електродах і контактах забезпечується вибором відповідних матеріалів і малою корозійною активністю електроліту.

Перенапруження водню на катоді сильно залежить від матеріалу цього електрода і зростає при збільшенні щільності струму (ця залежність вперше встановлена Тафелем ще в 1905 р.):

$$\Delta\varphi = a + b \lg i,$$

де i - щільність струму (загальний струм ділений на істинну площу поверхні електрода); a й b - константи, що залежать від матеріалу електрода і стану його поверхні, від температури та інших факторів. Так, перенапряга водню на платині при низьких густинах струму прагне до нуля, а на нікелі залишається не нижче 0,4 В. Аналогічне вираження є вірним і для кисневого перенапруження. Щоб знизити ці перенапруження, необхідно використовувати відповідні електродні матеріали (або матеріали для обробки поверхні електродів), збільшувати істинну поверхню електродів, наприклад, використовуючи високопористі матеріали або піддавати електрод обробці, що підвищує пористість. Цим досягається збільшення реальної поверхні без збільшення загального розміру осередку.

Поряд з цим, можливе використання каталітичних добавок. Механізм їх дії полягає в утворенні комплексів з матеріалом електродів, що полегшують процес адсорбції іонів, в результаті чого знижується перенапруження.

Метою використання каталізатора є прискорення електродної реакції на самій поверхні електрода. Деякі електроди об'єднують в собі обидва підходи (застосовується каталізатор з сильно розвиненою поверхнею). Переваги каталітичних електродів пов'язані з підвищенням швидкостей

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						52
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

реакцій, можливістю застосування більш високої щільності струму і, відповідно, менших розмірів комірки для даного виходу водню. Слід зазначити, що ефективність більшості відомих каталізаторів для кисневого електрода мала. Концентраційна поляризація, пов'язана з єбідненням приелектродних зон, що розряджаються іонами, в разі електролізу води зазвичай незначна.

Таким чином, загальні вимоги до електродним матеріалами: низьке перенапруження; велика поверхня; каталітична активність; корозійна стійкість; тривала працездатність.

При застосуванні дорогих електродів комірка повинна працювати при підвищених щільностях струму, щоб питомі капітальні вкладення не перевищували економічно виправданих меж. При підвищених щільності необхідні більш високі потенціали, тому виграш до деякої міри скорочується.

Вплив матеріалу електродів, діафрагм та каталізаторів на процес електролізу води. З метою підвищення реальної ефективності процесу електролізу, прискорення електрохімічних реакцій, що діють потенціали можуть бути знижені для даного струму використанням електродів, що несуть каталітично активні метали або підданих обробці, що підвищує їх пористість. Основною метою подібної обробки електродів, структури їх поверхні є збільшення реальної поверхні електрода без збільшення загального розміру комірки.

Слід підкреслити, що структура поверхонь електродів залежить не тільки від складу каталітичних добавок, але і від методів їх приготування і нанесення на поверхню, а також від методів попередньої обробки та активації самої поверхні електродів. Тільки при правильному виборі цих методів, чіткому дотриманні умов підготовки електродів і нанесення добавок можна розраховувати на істотне прискорення електродних реакцій, що в остаточному підсумку приведе до зниження потенціалу розкладання води.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						53
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Для поділу отриманих в процесі електролізу газоподібних продуктів електроліт і газовий простір електролізера розділяють газонепроникною діафрагмою на анодну і катодну простір. Цей простий по конструкції пристрій забезпечує одну з найбільш важливих переваг електролізу. Діафрагми проникні для іонів H^+ і OH^- і в малому ступені впливають на внутрішній опір осередку. Корозійна і температурна стійкість, малий розмір пор - вимоги, що пред'являються до матеріалів для виготовлення діафрагм (мембран). Сучасні діафрагми зазвичай виготовляють з азбесту, проте їх виконують і на основі пластичних мас.

Енерговитрати в сучасних процесах електролізу води. В сучасних промислових процесах електролізу води внаслідок незворотних втрат напруга на електродах практично перевищує теоретичне (1,7 В) і становить 1,8-2,9 В. Якщо в двополюсних електролізерах процес протікає при нормальному тиску і при густинах струму від 500 до 2500 А/м² (0,2-1,0 м³ Н₂/м² поверхні електрода на годину), то для виробництва 1 м³ Н₂ потрібно 4,3-4,6 кВт-год електроенергії.

У серійних електролізерах високого тиску (до 3,0 МПа) величина споживаної енергії становить 4,5 кВт год/м³ Н₂. Однак при ККД електролізу 85%, витрати електричної енергії складуть приблизно 3,5 кВт-ч/м³ Н₂, або 39 тис. кВт год на 1 т водню.

За наявними даними в даний час електролізери фірми Electric Power Development, що працюють при високих температурі і тиску, мають ККД 90%, електролізери фірми General Electric Co. з твердим полімерним електролітом і фірми Teledyne (лужний осередок) мають ККД до 90%. Високотемпературні електролізери, що розробляються в Німеччині і працюють при температурі 1170 К, мають ККД, що наближається до 100%.

В даний час використовують промислові комірки двох типів: комірки монополярного танк-типу і біполярні фільтрпресного типу. Монополярний електролізер являє собою, по суті, ряд паралельно з'єднаних осередків, тоді

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						54
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

як біполярний електролізер складається з серії осередків. Електролізери зазвичай працюють при температурах 330-350 К і атмосферному тиску, при цьому їх електрична ефективність становить 54-64%, що відповідає напрузі 1,90-2,25 В на комірці. Монополярна комірка зазвичай працює при густинах струму приблизно 1100 - 1600, біполярна - 1600-2100 А/м². Осередки служать більше 20 років.

У стандартних електролізерах використовують нікель для обох електродів, хоча на кисневому електроді він перетворюється, в оксид нікелю. Нікель можна використовувати до температури 420 К, при температурах понад 500 К оксид нікелю активний по відношенню до лугу. Платина є дорогим, але досить ефективним електродним матеріалом (зважаючи на її добрі електрокаталітичні властивості і високого опору корозії). Вона працює «на кисневому електроді» тільки з дуже тонким оксидним шаром і є більш гарним провідником, ніж нікель, при низьких температурах. Її можна використовувати у вигляді дуже тонкого шару (2-10 г/м²). Вона особливо необхідна у випадку високих температур в комірці з кислим або лужним електролітом, де високий корозійний опір може виявитися істотним.

При звичайному, широко використовуваному в промисловій техніці, методі електролізу води, електроліз проводять при температурі від 60-70 ° С до 80-85 ° С і щільності струму 1200-2500 А/м². Енерговитрати при цьому коливаються в залежності від температури процесу, використовуваного тиску, якості електродів, конструкції електролізера, використання тепла процесу і ряду інших факторів в межах 4,5-5,2 до 6 кВт год/м³ H₂; ККД електролізу досягає в сучасних установках 61%. На отримання 1 м³ H₂ витрачається практично 0,9 л води.

Дослідження останніх років показують можливість підняти вихід по витраченій електроенергії до 70...80% і навіть до 90% шляхом різкого зниження незворотних втрат.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						55
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Розрахунок витрат водню і вибір електролізера

Максимальна продуктивність електролізера буде використовуватися на режимі 50% від номінального навантаження. Тоді годинний витрата палива складає:

$$G_{\text{ч}} = g_e N_e = 0,179 \times 4050 = 724,95 \text{ кг/год},$$

де $G_{\text{ч}}$ - витрата палива за годину;

g_e - середня ефективна витрата палива;

N_e - потужність двигуна. При використанні добавки водню $\omega_H = 0,5\%$ по масі, витрачається водню в годину

$$G_H = \omega_H G_{\text{ч}} = 0,005 \times 724,95 = 3,625 \text{ кг}.$$

При щільності водню $\rho_H = 0,0899 \text{ кг/м}^3$, об'єм витраченого на годину водню, узятий за н.у. дорівнює

$$V_H = \frac{G_H}{\rho_H} = \frac{3,625}{0,0899} = 40,32 \text{ м}^3.$$

Вказаним параметрам відповідає електролізер фірми «Ерлікон» EBN 110. Основні характеристики наведено в таблиці 3.2.

Потужність, що витрачається на виробництво водню

$$W_e = G_H W_{\text{CH}} = 40,32 \times 3,83 = 154,4 \text{ кВт}$$

Електролізери «Ерлікон» фільтрпресного типу (рис. 3.2) для роботи при атмосферному тиску випускаються різної продуктивності - від 2 до 500 м³/год водню. У залежності від необхідної потужності кількість комірок в електролізері може змінюватися від 5 до 140.

Електролізери малої потужності працюють без зовнішньої циркуляції електроліту. Охолодження електролізера здійснюється за рахунок віддачі тепла його зовнішньою поверхнею. Для підвищення коефіцієнта тепловіддачі від поверхні апарату електролізери укладені в кожух, через який продувається повітря. У електролізерах великої потужності організована примусова циркуляція електроліту через холодильник за допомогою насоса.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						56
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

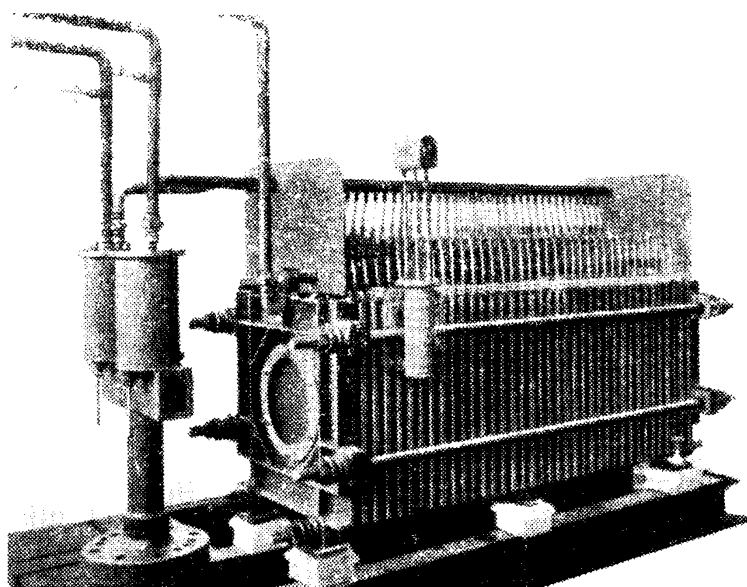


Рисунок 3.2 – Електролізер фірми «Ерлікон»

В електролізері застосовуються біполярні електроди з виносними перфорованими листами, одинарна азбестова діафрагма і зовнішні газозбірні канали для водню і кисню. Виносні електроди, перфоровані круглими отворами, попарно прикріплені металевими анкерами до основного листа, який виконує роль роздільної перегородки. Електроди ізольовані від діафрагмової рами прокладкою ущільнювача. Діафрагма з азбестової тканини кріпиться до рами за допомогою накладок і заклепок. Всі ті частини, з якими стикається діафрагмова тканина, округлені для зменшення її стирання. Анодна сторона електродів і поверхня діафрагмової рами нікельовані, заклепки для кріплення діафрагми виготовлені з чистого нікелю. Катодна поверхню електрода піддається спеціальній обробці для зниження перенапруги виділення водню. Електролітичні комірки стягуються в єдиний блок електролізера між кінцевими плитами за допомогою стяжних болтів з пружинами. Рами електролізера через ізолятори спираються на фундамент.

У електролізерах великої потужності є середня камера для охолодження електроліту і пристрої для його примусової циркуляції і фільтрації. У електролізерах меншої потужності камера для охолодження електроліту може розташовуватися також на кінці електролізера.

Таблиця 3.2 – Технічні показники електролізерів «Ерлікон»

Тип електролізера	EBN-55	EBN-110	EBN-220	EBN-330
Максимальна кількість комірок	20	40	50	70
Нормальне навантаження, А	1100	2200	4400	6600
Продуктивність по водню, м ³ /год	10	40	100	210
Габарити, мм				
довжина	2600	3800	4400	6600
ширина	1800	2050	3150	3960
висота	2500	3300	3800	3800
Маса, кг	5000	10000	18400	31400

З комірок газу по нахиленим трубкам відводяться в газовіддільник. Луг з газовіддільника надходить в бак, звідки через фільтр за допомогою насоса, виконаного без сальникових ущільнень, по трубопроводу подається до осередку електролізера. Газовіддільник служить також для вирівнювання тиску газів в анодному і катодному відділеннях комірок. В електролізері може підтримуватися надлишковий тиск до 500 мм вод. ст. (0,05 МПа) Електролізер працює на 25% розчині КОН при 75 ° С, напруга на комірці одно 2,1-2,3 в, при цьому витрата електроенергії постійного струму складає 4,1 - 4,6 кВт год/м³ H₂.

Характеристики декількох моделей біполярних електролізерів «Ерлікон» типу EBN різної продуктивності наведені у таблиці 3.2.

Навантаження на електролізери може бути підвищена на 10% у порівнянні з номінальним. В залежності від потреби в водні, кількість комірок в електролізерах може бути змінена для забезпечення продуктивності агрегату в межах 2 - 210 м³/год H₂.

Катодна сторона біполярних електродів піддається спеціальній активації за технологією фірми «Норск-Гідро», що забезпечує зниження напруги на 10% в порівнянні із звичайними неактивованими катодами. З плином часу напруга на електролізері підвищується, але незначно, тому повторну активацію катодів зазвичай проводять при капітальному ремонті після 8-12 років нормальної експлуатації.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						58
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Охолодження, промивка і часткова сушка газів проводяться в колоні з насадкою, нижня частина якої служить приймачем живильної води. Живильна вода за допомогою насоса безперервно циркулює через колони і холодильник, а частина її подається на живлення електролізера. Охолоджуюча вода з теплообмінника надходить на попереднє охолодження газів в газовіддільник.

3.3 Гібридний компресор

В кінці 60-х рр. фірмою «Філіпс» було зареєстровано відкриття, яке показало, що деякі гексагональні інтерметалідні з'єднання типу RNi_5 (R - рідкісноземельний елемент, Ni - нікель або кобальт) ефективно поглинають і виділяють водень, причому процес поглинання водню йде при нормальних температурах, а процес виділення - при порівняно невисоких температурах (50...100 ° C). Найбільш цікавий представник даного типу інтерметалідів - $LaNi_5$ може поглинати до 1450 об'ємів водню. Щільність водню в $LaNi_5$ при тиску 0,25 МПа і кімнатній температурі майже вдвічі перевищує щільність рідкого водню.

Загальні відомості про оборотні гідриди. Гідриди металів і сплавів являють собою тверді розчини водню в металах і, хоча реакції металів з воднем вивчаються вже понад 100 років, передбачити для інтерметалідних з'єднань вміст водню в них неможливо. Тому відомі в даний час гідриди отримані експериментально і в більшості випадково. Відсутність сформованих уявлень про природу абсорбції водню металами ускладнює розробку водневих акумуляторів із заданими властивостями на основі гідридів.

Процес утворення окремих екзотермічних гідридів залежно від тиску й температури можна представити за допомогою ізотерм рівноважних тисків. На рис. 3.3 представлені ізотерми рівноважних тисків для ряду гідридів, з яких випливає, що якщо рівноважний тиск водню підвищується, то

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						59
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

концентрація його в сплавi зростає. При досягненні межi розчинності може виникнути нова фаза, для існування якої за законом фаз Гібса характерне утворення плато тиску. Перетворення всього сплаву в первинний гідрид (α -фаза) відповідає стехіометрії фази і інтенсивному зростанню тиску. Якщо сплав може утворювати другу фазу (β -фазу), як, наприклад, $FeTi$ (рис. 47, в), то з'являється ще одне плато тиску, після якого тиск знову круто зростає.

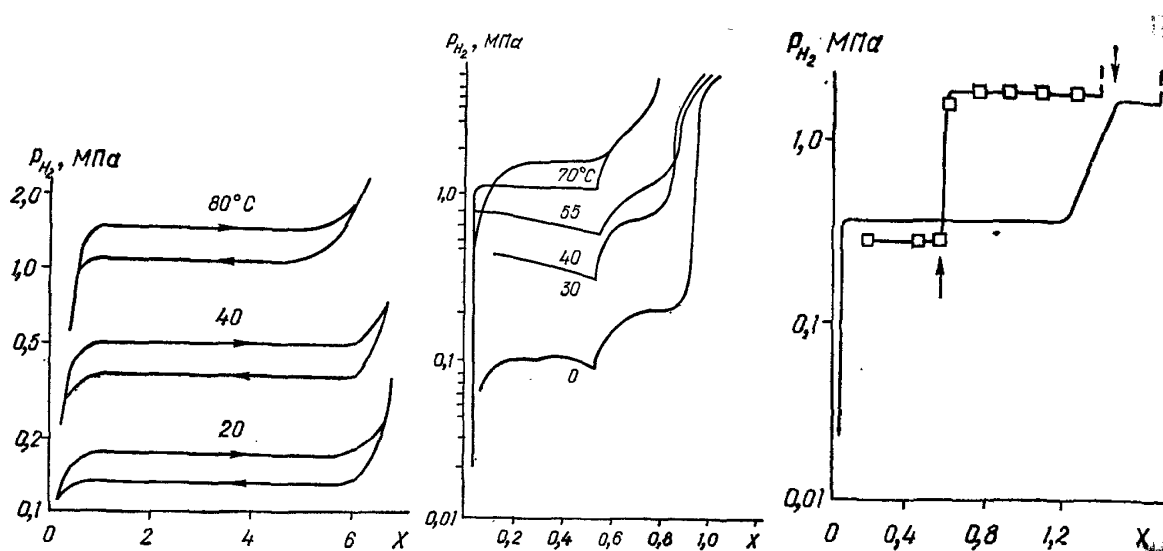


Рисунок 3.3 – Ізотерми рівноважного Тиску водню в системах $LaNi_5H_x$ (а); $MgCuH_x$ (б) $FeTiH_x$ (в) (x - кількість атомів водню в гідриді)

Як всі хімічні реакції, утворення гідридів йде з перетворенням енергії. Енергія утворення гідриду q_s (кДж / моль H_2) залежить від фізичних властивостей гідриду і може бути визначена або аналітично $q_s = 2,3RTB$ (де R - газова постійна водню, B -постійна для даного гідриду величина), або отримана експериментально-калориметричним способом. Її величина для відомих гідридів коливається в досить широких межах. Як показує практика, для оптимізованого водневого акумулятора, працюючого в енергоустановки з ДВЗ, енергія утворення не повинна перевищувати ± 40 кДж / моль H_2 , в іншому випадку можуть виникнути серйозні проблеми з нагріванням або охолодженням гідриду в процесах десорбції і сорбції водню.

Одним з напрямків у розробці гідридів із заданими властивостями, наприклад з мінімально можливою енергією утворення є спосіб комбінації екзотермічних металів з ендотермічними. При цьому можуть мати місце

комбінації, що утворюють гідриди з енергією утворення, істотно меншою, ніж у вихідних металів. Проте передбачити, чи утворюється взагалі в даній комбінації металів гідрид, не можна. Тому експериментальні дослідження в цьому напрямку можуть йти від бінарних сплавів, одним з компонентів яких може бути натрій, калій, магній, кальцій, кремній і титан, а іншим - залізо, алюміній, нікель, мідь і цинк. У цих системах існує велике число окремих сплавів, але лише деякі з них відомі в літературі як утворюючі гідриди, наприклад Mg_2Ni-H_4 ; $Ti_2Ni-H_{2,5}$; $TiV_{1,4}-H_{4,6}$; $FeTs-H_2$; $MgCu-H_3$.

Композиційно гідридоутворюючі сплави можуть мати досить широкі межі, так, наприклад, сплав по патенту Дж. Реллі може мати такий склад: 0,4...0,8 масових часток нікелю та 0,2...0,6 масових часток магнію, але найбільш прийнятним для водневих акумуляторів виявився сплав, що складається з 0,53 масових часткою нікелю з 0,47 масових часток магнію, такий сплав відповідає формулі Mg_2Ni . Його сорбційна здатність близько 0,04 масових часток. Водень поглинається сплавом при температурі близько 250 °C і тиску 0,122 МПа. Нижче 250 °C з'єднання стабільно, однак енергія утворення гідриду занадто висока - 61,2 кДж / моль H_2 . Розкладання цього гідриду починається при температурі вище 250 °C. При постійній температурі воень виділяється з постійною швидкістю, поки в гідриді не залишиться близько 0,01 масової частки водню.

Гідрид $FeTiH_2$ існує при вмісті титану в кількості 0,40...0,48 масових часток, оптимальному складу з точки зору сорбційної здатності відповідає 0,4617 масових часток. Надлишковий вміст титану в сплаві сприяє збільшенню сорбції водню. Часткове заміщення заліза іншим перехідним металом практично не змінює кількість сорбційного водню, а лише викликає зсув ізотерм рівноважного тиску, що дає можливість регулювати рівноважний тиск водню над гідридом в потрібному напрямку. Це може мати велике практичне значення для створення гідридів із заданими

властивостями, однак експериментальних матеріалів по сорбції великої кількості водню потрійними системами порівняно мало.

Система $FeTi-H_2$ має характеристики, які найбільше підходять для акумуляторів водню. Енергія утворення цього гідриду не перевищує 30 кДж / моль H_2 , його сорбційна здатність близько 0,02 масових долей, рівноважний тиск водню при температурі 0 °С складає приблизно 0,15 МПа, а при температурі 50 °С - 1,0 МПа. За температурними характеристиками це найбільш підходящий гідрид для транспортних акумуляторів водню.

Ще одним представником бінарних гідридоутворюючих сплавів є мідно-магнієві сплави. Композиційно вони мають дуже широкі межі (0,09...0,83 масових часток міді і 0,17...0,91 масових часток магнію). Найкращими сорбційними характеристиками (близько 0,03 масових часток) має сплав, що складається з 0,56 масових часток міді і 0,44 масових часток магнію і відповідний формулі Mg_2Cu .

Процес сорбції водню цим сплавом проходить при температурі приблизно 250 °С і тиску 1,5 МПа. Швидкість сорбції прямо пропорційна тиску, при якому проводиться насичення. Енергія утворення цього гідриду також дуже висока, вона складає 65 кДж / моль H_2 .

Дослідження процесів сорбції водню інтерметалідними з'єднаннями показують, що ряд закономірностей є загальним для всіх з'єднань. Для швидкого поглинання максимальної кількості водню сплав повинен застосовуватися у вигляді активованого порошку з добре розвиненою поверхнею. Активація матеріалу досягається тривалою витримкою шматочків або злитків у водні при тиску в кілька мегапаскалей із застосуванням термораскачування. В результаті матеріал руйнується, перетворюючись на дрібний порошок. Високоактивований матеріал сприяє досягненню високих швидкостей реакцій.

Більшість відомих гідридів можна розбити на дві групи: низькотемпературні з тиском десорбції 1,0 МПа в інтервалі температур

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						62
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

20...100 °C і високотемпературні з тиском десорбції 0,1 МПа при температурах вище 100 °C. У ряді низькотемпературних гідридів інтерес представляє група бінарних систем на основі титану, серед яких максимальну сорбційну здатність і найменшу вартість має гідрид $TiFe \leftarrow H_2$. Він знайшов найбільше поширення в експериментальних зразках автомобільних акумуляторів.

Гідрид $LaNi_5 H_{6,7}$, що відноситься до гідридів із загальною формулою RNi_5-H_7 , зважаючи на надзвичайно високу вартість лантану і обмеженість природних запасів може застосовуватися в якості автомобільного акумулятора водню.

У ряді гідридів знаходиться група моногідридів, таких, наприклад, як $VH-VH_2$, $NbH-NbH_2$ і MgH_2 . Оскільки запаси двох перших гідридів досить обмежені, використовувати їх не доцільно. Моногідрид MgH_2 являє собою незворотний металогідридів з вмістом водню 0,08 масових часткою. Однак, незважаючи на дуже високу ємність по водню, складність отримання і особливо високу нестабільність цього гідриду створюють певні труднощі широкого його застосування для транспортних енергетичних установок.

Високотемпературні гідриди магнієвої групи становлять інтерес з точки зору високої сорбційної здатності, однак висока енергія утворення може бути перешкодою на шляху їх використання в якості автомобільних акумуляторів водню. Можливість їх застосування для цієї мети може бути встановлено тільки після аналізу енергетичного балансу енергоустановки.

Використання гідридів з різними характеристиками по температурам десорбції водню зумовлює можливість розробки варіантів схем транспортних енергоустановок. У схемах з низькотемпературним гідридом в якості теплоносія може бути використана рідина системи охолодження двигуна або вихлопних газів. У схемах з високотемпературним гідридом - тільки підходящих газів, а в комбінованих схемах - і те й інше відповідно до температурних блоків.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						63
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

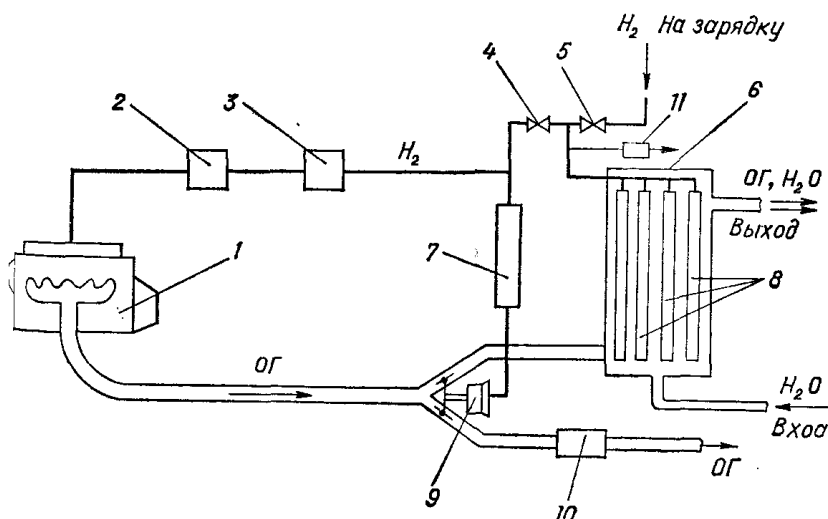


Рисунок 3.4 – Принципова схема енергоустановки з ДВЗ і гідридним акумулятором водню, які використовують тепло вихлопних газів

Принципова схема енергоустановки з гідридним акумуляторів водню і підведенням тепла від вихлопних газів показана на рис. 3.4. Вихлопні газы двигуна 1 через розподільник 9 надходять гідридний бак 6, де частина тепла віддають гідридним елементам. Теплота, сприйнята гідридом, витрачається на процес сорбції водню. Внаслідок того що в схемах з низькотемпературним гідридом енергія вихлопних газів на більшості режимів роботи двигуна значно перевищує необхідну для дисоціації гідриду, щоб уникнути перегріву бака і збільшення тиску в ньому вище розрахункового її надлишок необхідно скидати через трубу 10. Це досягається установкою розподільника вихлопних газів 9, який кількісно регулює витрату вихлопних газів через гідридний бак і тим самим забезпечує його нормальну роботу при температурах значно перевищує дисоціацію гідриду для заданого рівноважного тиску, на випадок відмови розподільника вихлопних газів на водневої магістралі чи високого тиску встановлюється запобіжний клапан 11, регульований на критичний тиск в системі.

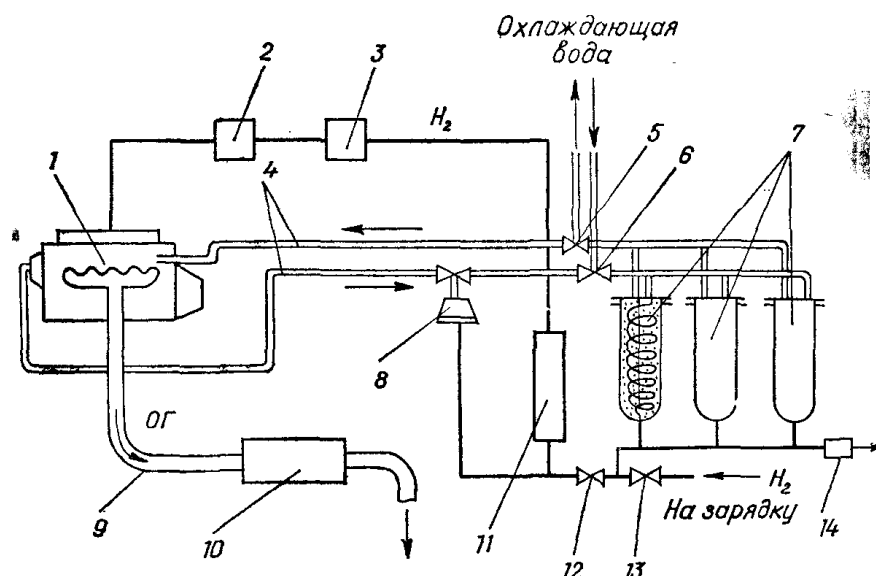


Рисунок 3.5 – Принципова схема енергоустановки з гідридним акумулятором водню, які використовують тепло системи охолодження ДВЗ: 1 - ДВЗ; 2 - дозуючий орган; 3 - редуктор; 4 - трубопроводи; 5,6 - вентилі підведення охолоджуючої рідини при заправці; 7 - гідридні патрони; 8 - розподільник теплоносія; 9, 10 - система випуску вихлопних газів з глушником; 11 - накопичувальна ємність; 12, 13 - заправні вентилі; 14 - запобіжний клапан.

Водень, дисоційований з гідриду, збирається в накопичувальній ємності 7, звідки після зниження тиску в редукторі 3 надходить у двигун через дозуючий пристрій 2. При тривалій стоянці транспортного засобу гідридний бак відключається від системи живлення двигуна вентилем 4.

Зарядка гідриду воднем виробляється через вентиль 5, при цьому охолодження може здійснюватися або проточною водою, або повітрям. В процесі заправки водень вступає в реакцію з інтерметалідом, утворюючи гідрид.

Схема енергоустановки з підведенням тепла до гідридів з системи охолодження двигуна (рис. 3.5) аналогічна попередньої схемою. Принципова її відмінність полягає в конструктивному виконанні гідридні акумулятори, обумовленому типом теплоносія. Виконання гідридні акумулятори у вигляді окремих елементів видається більш доцільним як з точки зору раціонального компонування, так і з точки зору зниження часу заправки гідриду воднем.

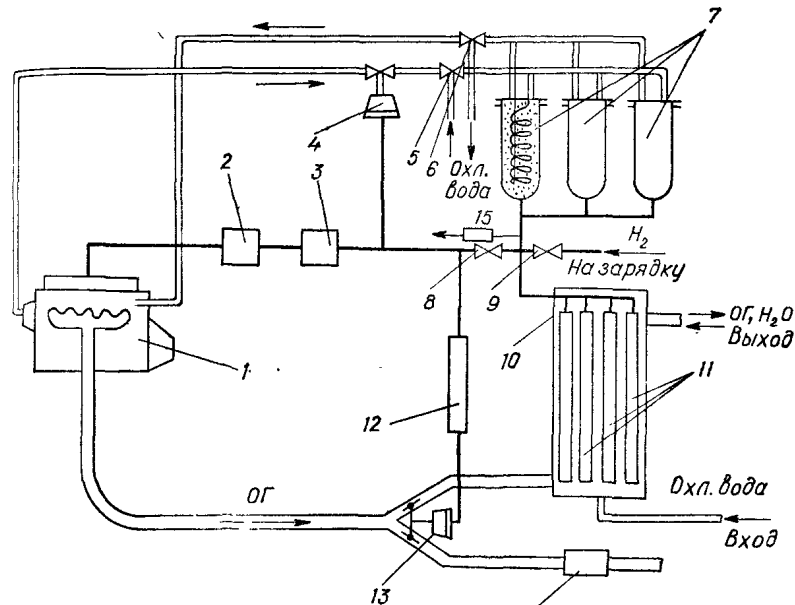


Рисунок 3.6 - Принципова схема комбінованої енергоустановки з ДВЗ та гідридними акумуляторами водню: 1 - ДВЗ; 2 - дозуючий орган; 3 - редуктор; 4 - розподільник теплоносія, 5,6 - вентилі підведення охолоджуючої рідини при заправці; 7 - низькотемпературні гідридні: е блоки; 8,9 - заправні вентилі; 10 – високотемпературні гідридний блок; 11 - Накопичувальна ємність; 12 - розподільник ОГ; 13 _ система випуску ОГ; 14 - запобіжний вентиль

Комбіновані схеми з низькотемпературним і високотемпературним гідридом являють собою, як правило, комбінацію двох перших схем (рис. 3.6). Високотемпературний блок повинен розташовуватися поблизу вихлопного патрубка двигуна, виконуючи одночасно функції основного глушника. Обидва блоки працюють на загальну накопичувальну ємність, при цьому низькотемпературний блок відключається від системи охолодження двигуна при заданому тиску в накопичувальній ємності, що виключає його роботу на тих режимах роботи двигуна, на яких забезпечується ефективна робота високотемпературного блоку.

Практичний стан робіт по використанню металогідридів в якості транспортних акумуляторів та компресорів водню показує, що для реалізації цього напрямку є досить обґрунтовані передумови: простота і надійність

конструкцій; високий ступінь безпеки в експлуатації; відносно низька вартість. І хоча масові показники цього типу акумуляторів ще досить високі, представляється доцільним застосування водневих технологій для транспорту, а також для спеціальних цілей.

Застосування компресора, що працює на основі гідридної технології, дозволить підвищувати тиск водню після електролізера до необхідного тиску уприскування і очищати водень від небажаних домішок. Крім того, використання компресора такого типу дозволить накопичувати в робочому об'ємі гідриду водень, який можна використовувати відразу після підключення водневої підсистеми. В якості робочого матеріалу застосуємо матеріал $LaNi_5$, підігрів такого матеріалу для десорбції водню можна здійснювати від вихлопних газів. Виконати такий компресор необхідно двосекційним, поки одна секція буде жити двигун, інша буде насичуватися воднем від електролізера. Маса порошку інтерметаліда однієї секції для забезпечення годинної роботи двигуна при максимальному споживанні водню m_{LaNi5} можна розрахувати за формулою

$$m_{LaNi5} = \frac{G_H}{\omega_{\max}^H} = \frac{3,625}{0,008} = 453 \approx 460 \text{ кг}$$

де $\omega_{\max}^H$ - максимальна масова концентрація водню в гідриді. При щільності $\rho_{LaNi5} = 8100 \text{ кг/м}^3$, об'єм секції буде дорівнювати

$$V_{LaNi5} = K_V \frac{m_{LaNi5}}{\rho_{LaNi5}} = 1,2 \frac{460}{8100} = 0,0568 \text{ м}^3$$

де K_V - коефіцієнт об'ємного розширення гідриду, приймаємо $K_V = 1,2$.

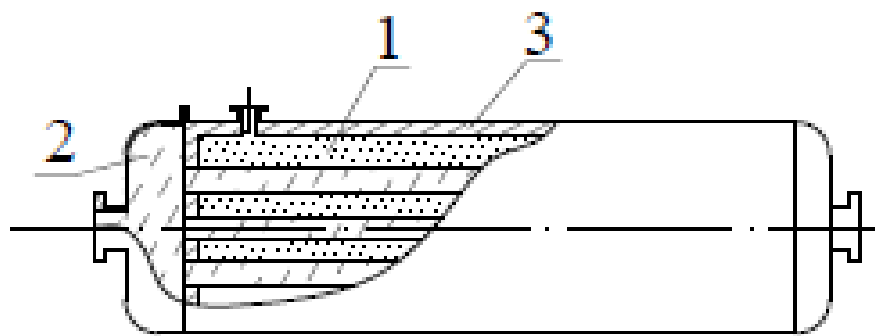


Рисунок 3.7 – Секція гідридного компресора

Гідридний компресор буде мати вигляд, двох секцій, зображених на рисунку 3.7. Секція складається з корпусу 3, в якому розміщено метало гідрид 1. Поглинання/виділення водню можливо регулювати змінюючи температуру теплоносія 2.

В сучасних установках доцільно застосувати автоматичні пристрої керування температурою теплоносія, що дозволить компресору функціонувати без втручання оператора. Потрібно проводити лише контроль періодичний контроль.

3.4 Впорскування водню та паливна схема двигуна

Подача водню пов'язана з рядом труднощів, оскільки водень при суміші з повітрям утворює вибухонебезпечну суміш - так званий гримучий газ. Найбільшу вибухонебезпечність цей газ має при об'ємному відношенні водню і кисню 2:1, або водню і повітря наближено 2:5, так як в повітрі кисню міститься приблизно 21%. Вважається, що вибухонебезпечні концентрації водню з киснем виникають від 4% до 96% об'ємних. При суміші з повітрям від 4% до 75 (74)% за об'ємом. Суттєві складності можуть виникнути через утворення зворотного спалаху. Для попередження зворотного спалаху на впуску можуть застосовуватися різні заходи. Непогані результати дає

присадка води до паливоповітряної суміші. Змінюючи кількість води в водень-повітряній суміші, можна значно розширити межі стійкої роботи двигуна і при $m_{H_2O}/m_{H_2} = 5$ виключити повністю зворотний спалах. Присадка води на впуску може здійснюватися інжекткуванням, причому кількість води повинна змінюватися в залежності від швидкісного і навантажувального режимів двигуна.

Незважаючи на задовільні результати щодо попередження зворотних спалахів, присадка води у великих кількостях небажана, оскільки веде до значного обводнення мастила в результаті прориву продуктів згоряння в картер і до помітного зниження паливної економічності двигуна.

Схильність водень-повітряної суміші до самозаймання в процесі впуску може бути також зменшена частковою рециркуляцією вихлопних газів внаслідок розведення її інертними компонентами. Кількість рециркулюючих газів, як правило, не перевищує 10-20% об'єму повітряного заряду, що надходить у двигун. Хоча рециркуляція вихлопних газів поряд із запобіганням зворотних спалахів сприяє зниженню утворення оксидів азоту, застосування її в двигунах не завжди доцільно, так як вона веде до значної втрати потужності через падіння наповнення циліндру двигунів.

Найбільш доцільним для запобігання зворотних спалахів є циклова подача водню в область впускного клапана кожного циліндра або подача водню безпосередньо в циліндр. Нижче наведено кілька варіантів подачі водню в область впускного клапана. У конструкції, показаної на рис. 3.8, подача водню здійснюється через кілька трубок, виведених на додаткове сидло впускного клапана.

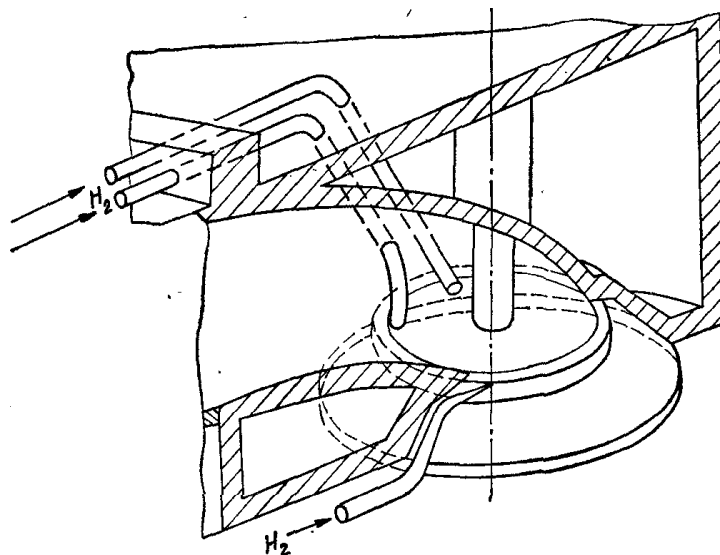


Рисунок 3.8 - Схема подачі водню через сідло впускного клапана

При відкритті впускного клапана додаткова фаска звільняє витратні отвори трубок і водень під дією розрідження всмоктується в циліндр разом з повітрям. Така конструкція має ряд серйозних недоліків: по-перше, технологічно дуже складно виконати якісне ущільнення по двом співвісним сідлам двома різними фасками однієї деталі; по-друге, ця конструкція не може гарантувати повного запобігання зворотних спалахів, оскільки водень і повітря одночасно починають подаватися в циліндр, а отже, можливо вже в початковій стадії впуску формування водень-повітряної суміші та її займання.

В двох інших варіантах конструкції подача водню починається дещо пізніше моменту відкриття впускного клапана, а відсічення водню - дещо раніше закриття, причому золотник 2 знаходиться в постійному контакті з тарілкою впускного клапана за допомогою пружини 1 і тиск водню над ним приблизно 0,1...0,5 МПа. При відкритті впускного клапана золотник опускається, відкриваючи отвір 4 подачі водень. У другому варіанті (рис. 3.9) роль золотникового пристрою для подачі водню виконує стрижень клапана і напрямна. Стрижень впускного клапана 4 і направляюча 6 виконані ступінчастими таким чином, що в будь-якому положенні клапана між

стрижнем і направляючою утворюється порожнина, в діаметра 1 на стрижні поблизу голівки клапана. Щоб уникнути витоку водню через спряження стрижень клапана - керуюча на направляючій виконана завантажувальна проточка 3, пов'язана клапаном 2 зі впускним патрубком. При відкритті клапана замикаючий поясок виходить з направляючої і водень через його шліцовану частину надходить в область впускного клапана.

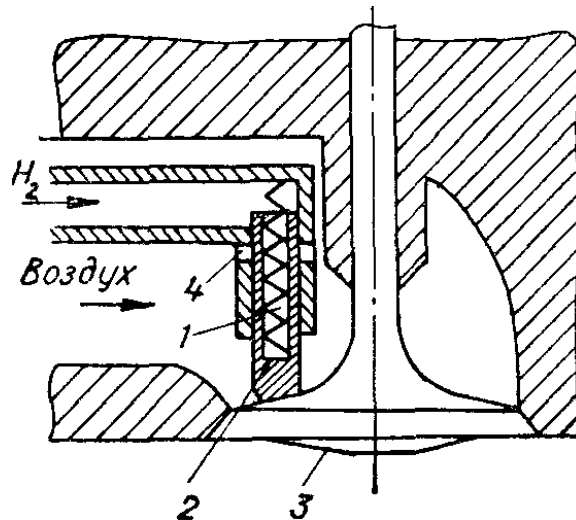


Рисунок 3.9 - Схема золотникового пристрою циклової подачі водню

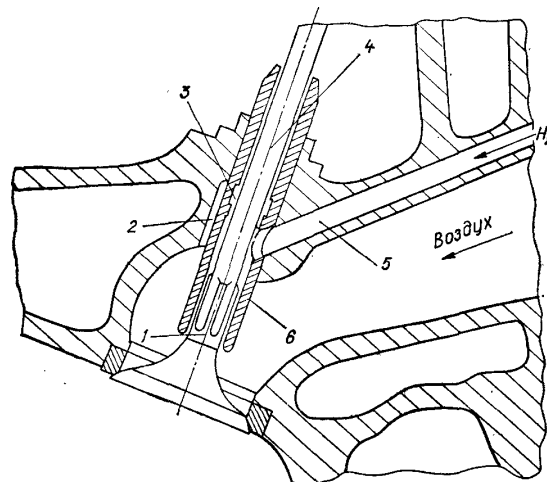


Рисунок 3.10 - Схема циклової подачі водню в двигун

Поряд з відносно простими способами циклової піді водню знаходять застосування і досить складні, потребуючі значної модернізації двигуна. На

рис. 3.10 представлена схема циклової подачі водню, розроблена в Токійському університеті. У цій схемі водень під тиском 0,4 - 0,5 МПа подається у впускні патрубки кожного циліндра за допомогою додаткового клапанного механізму, що приводиться від додаткового розподільного валу. Клапани подачі водню відкриваються одночасно зі впускними клапанами, а закриваються після повороту колінчастого валу на 90 °.

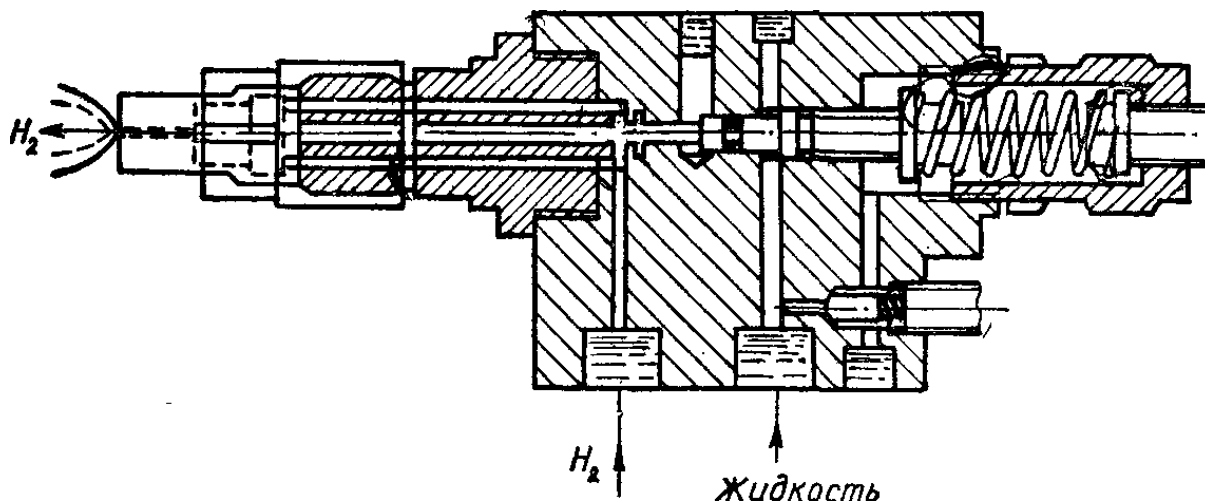


Рисунок 3.11 – Схема циклової подачі водню у двигун

У разі внутрішнього сумішоутворення - подача водню безпосередньо в циліндр в пізній стадії впуску або на стисненні - зворотні спалаху виключаються повністю. Внутрішнє сумішоутворення також перспективно для підвищення питомої потужності водневих двигунів. Однак реалізація внутрішнього сумішоутворення на сучасних двигунах сполучена з рядом труднощів, таких, як подача значної кількості водню (до третини робочого об'єму циліндра) за кілька мілісекунд.

Процес внутрішнього сумішоутворення одноциліндрового двигуна та схема водневої форсунки показані на рис. 3.11. При даному способі сумішоутворення водень подається в передкамеру спеціальної форсункою з гідравлічним приводом, здійснюваним від штатного насоса високого тиску двигуна в дизельному варіанті. Витрата водню регулюється зміною

тривалості уприскування і його тиску. Тривалість уприскування може змінюватися від 8..10 мс, а тиск - від 3 до 8 МПа. Момент початку уприскування водню також може змінюватися в широких межах: 15-35 ° до ВМТ, що дає можливість оптимізації моменту і тривалості подачі водню.

При додаванні малих домішок водню до основного палива, доцільно використовувати подачу водню в циліндр після закриття впускного клапана і заповнення циліндра свіжим повітрям. У цьому випадку водень впорскують (точніше, вдувають) аналогічно уприскуванню палива. Форсунка, у якої клапан подачі газоподібного водню в циліндр управляється гідравлічно (рис. 3.11). При такому способі подачі досягається така ж літрова потужність, як і у звичайного двигуна. При цьому тиск вприскування газоподібного водню, відповідно, має бути більше, ніж тиск повітря в циліндрі в момент подачі палива.

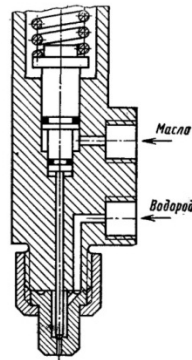


Рисунок 3.12 – Форсунка для подачі газоподібного водню в циліндр з гідравлічним управлінням клапана

Паливна схема в цілому залишається незмінною, але до неї необхідно додати водневий контур. Водневий контур буде складатися з електролізера EBN-110, двохсекційного гідридного компресора, форсунок для впорскування водню у циліндр двигуна, трубопроводів та запірної арматури.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Нормативно-правова та законодавча база охорони навколишнього середовища

Усі існуючі організаційно-правові документи по забезпеченню екологічної безпеки при експлуатації морського транспорту підрозділяються на:

- міжнародні;
- національні, для конкретних прибережних держав;
- регіональні, для обмежених морських районів;
- відомчі, що походять зі специфіки й відомчої приналежності суден.

Подібна класифікація заснована на розподілі юрисдикції над водами світового океану, прийнятої в міжнароднім морським праві, згідно з конвенцією ООН по морському праву (1982 г).

У міжнароднім екологічному праві склалися основні принципи, які можна сформулювати в такий спосіб:

- загальний принцип захисту навколишнього середовища;
- принцип ненанесення шкоди природі іншої держави діями, чиненими на власній території;
- принцип відповідальності за нанесення шкоди природі іншої держави.

Усі ці принципи чітко сформульовані в "Конвенції ООН по морському праву" 1982 р.

Конвенція ОЙЛПОЛ-54 з поправками 1969 і 1971 років встановлювала основні вимоги по запобіганню забруднення моря нафтою, але залишалися не регламентованими інші можливі випадки забруднення моря іншими шкідливими речовинами.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						74
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У цей час головною міжнародною угодою, що обумовлюють запобігання забруднення навколишнього середовища суднами, є Міжнародна конвенція по запобіганню забруднення моря із суден від 1973 р, змінена й доповнена відповідно до Протоколу від 1978 р, офіційно іменована МАРПОЛ-73/78 (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as modified by the Protocol of 1978 relating thereto - MARPOL-73/78), що вступила в дію 2 жовтня 1983 року

Конвенція містить інструкції, спрямовані на запобігання й зменшення забруднення навколишнього середовища із суден, викладені у вигляді шістьох додатків до основного тексту конвенції:

Додаток I. Правила запобігання забруднення нафтою (Введене в дію з 02.10.83 р.)

Додаток II. Правила запобігання забруднення шкідливими рідкими речовинами, перевезеними наливом (Введене в дію з 02.10.83 р.)

Додаток III. Правила запобігання забруднення шкідливими речовинами, перевезеними морем в упаковці (Введене в дію з 28.02.94 р.)

Додаток IV. Правила запобігання забруднення стічними водами із суден (Введене в дію з 27.09.03 р. стосовно нових суден, а до всіх суден з 27.09.09 р.)

Додаток V. Правила запобігання забруднення сміттям із суден (Введено в дію 31.12.88 р.)

Додаток VI. Правила запобігання забруднення атмосфери із суден (Уведено в дію з 19.05.05 р.)

До міжнародних документів з екологічної безпеки на водному транспорті може бути віднесений і Міжнародний кодекс морського перевезення небезпечних вантажів - МК МПНВ International Maritime Dangerous Goods Code (IMDG Code).

В 1997 році було прийнято Резолюцію ІМО А 868(20) "Посібник з контролю й керування баластними операціями на суднах з метою зведення до

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						75
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

мінімуму переносу шкідливих водних організмів і патогенів, а в 2004 році ІМО прийняла текст "Міжнародної Конвенції про контроль водного баласту й опадів суден і управління ними".

Організаційно-правові аспекти забезпечення екологічної безпеки на морі, викладені також у наступних міжнародних угодах, розроблених і прийнятих під керівництвом ООН:

"Міжнародна Конвенція щодо втручання у відкритому морі у випадку аварій, що приводять до забруднення нафтою" 1969 р. Конвенція передбачає заходи щодо захисту інтересів народів держав - учасників від серйозних наслідків аварій у відкритому морі, у результаті яких виникає небезпека забруднення моря й узбереж нафтою. У Конвенції відбиті правила, обов'язки й відповідальність держав, у випадках аварій суден, що тягнуть за собою заподіяння або загрозу заподіяння збитку прибережній державі. Сторони тконвенції можуть приймати у відкритому морі заходи виняткового характеру, які не будуть порушувати принцип свободи відкритого моря. Це такі заходи, які необхідні для запобігання, зменшення або усунення серйозно й реально загрозливої їх узбережжю небезпеки забруднення нафтою внаслідок аварії. Такі заходи можуть включати навіть знищення судна й вантажу.

"Міжнародна Конвенція про громадянську відповідальність за збиток від забруднення нафтою", 1969 р.

"Міжнародна Конвенція про створення Міжнародного фонду для відшкодування збитку від забруднення нафтою", 1971 року змінена Протоколом 1992 року.

"Конвенція по запобіганню забруднення моря скиданнями відходів і інших матеріалів" 1972 року з поправками 1978 року й Протоколом 1996 року.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						76
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Велика увага питанням екологічної безпеки судноплавства приділене в "Міжнародному кодексі з управління безпечною експлуатацією суден і запобіганню забруднення" – МКУБ (International Safety Management Code (ISM Code)).

За результатами наглядової діяльності Класифікаційний орган видає суднам Міжнародні свідоцтва, передбачені МАРПОЛ - 73/78 для всіх суден:

- Міжнародне свідоцтво про запобігання забруднення нафтою (International Oil Pollution Certificate - IOPP);
- Міжнародне свідоцтво про запобігання забруднення стічними водами (International Savage Pollution Prevention Certificate - ISPP);
- Міжнародне свідоцтво про запобігання забруднення сміттям (International Garbage Pollution Certificate Prevention Certificate);
- Міжнародне свідоцтво по запобіганню забруднення повітря (International Air Pollution Prevention Certificate - IAPP) для судна в цілому;
- Міжнародне свідоцтво з запобігання забруднення повітря (Engine International Air Pollution Prevention Certificate - EIAPP) для кожного дизельного двигуна на судні Додаток, що підпадає під вимоги VI Конвенції МАРПОЛ-73/78.

Для нафтових танкерів і танкерів-хімовозів додатково МАРПОЛ-73/78 зобов'язує одержання для судна Міжнародного свідоцтва про запобігання забруднення під час перевезення шкідливих речовин наливом (International Pollution Prevention for the Carriage of Noxious Liquid Substances in Bulk Certificate - NLS);

4.2 Розрахунок рівня екологічної безпеки замкнутої водойми від промислових стічних вод

Техногенна система споживає природну прісну воду, в результаті обробки якої утворюються стічні води. Особливу шкоду для гідросфери

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						77
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

(замкнуті водойми, ріки, моря, океани) представляють розчинні сполуки важких металів.

При експлуатації суден та контакті їх металевих поверхонь з морським середовищем протікають електрохімічні процеси, в результаті яких у морське середовище надходять іони важких металів. Останні інгібірують життєдіяльність морепродуктів, приводять до порушення біохімічних процесів морського середовища, і, як наслідок, до зменшення біовиробництва синезелених водоростей і біопланктонів.

У даній практичній роботі розглянуто умови забруднення іонами важких металів гідросфери, визначено розрахунковим шляхом межі екологічної безпеки, запропоновано рекомендації з очищення стічних вод від іонів важких металів, створення замкнених водообігових циклів, використання повітряних холодильників-конденсаторів, замість водних.

Як шкідливі речовини, що надходять в озеро, приймаються сполуки важких металів, таких як:

- миш'як;
- ртуть;
- свинець.

Джерелами сполук цих металів являються такі промислові підприємства, як гальвано-хімічні, механообробні, металургійні, коксохімічні, нафтохімічні.

Важкі метали, що надходять зі стічними водами в замкнуту водойму, погіршують якість цієї води, що стає непридатною для розведення риб, питних і рекреаційних цілей.

Важкі метали, що надходять в організм людини по "харчовому ланцюжку", інгібірують процеси, що відбуваються в корі головного мозку, у спинному мозку й кровоносній системі. Результатом цього впливу на людину важких металів є такі важкі ускладнення, як лейкемія крові, проявляються тенденції до мутагенних й терратогенних наслідків.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						78
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

У результаті обробки природної прісної води в гальвано-хімічному виробництві утворюються промислові стічні води, які без очищення надходять у замкнуту водойму (рис. 3.1).

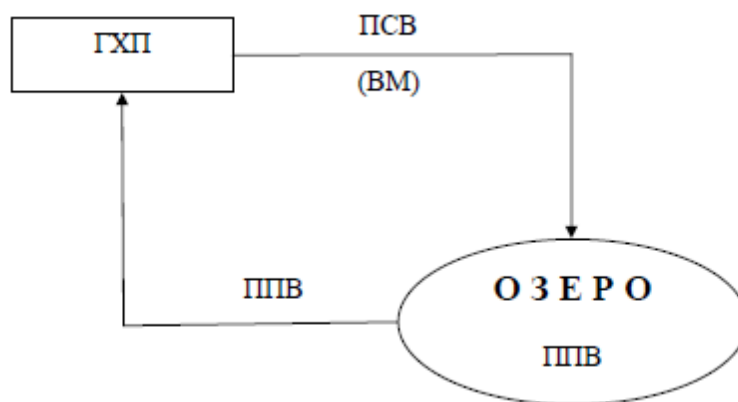


Рисунок 4.1 - Принципова схема утворення промислових стічних вод

Умовні позначення:

ППВ - природна прісна вода;

ГХП - гальвано-хімічне підприємство;

ПСВ - промислові стічні води;

ВМ - важкі метали

Потрібно визначити рівень екологічної небезпеки замкнутої водойми через один місяць і один рік.

Витрата стічної води через один місяць і один рік ($V_{\text{св міс}}, \text{м}^3$; $V_{\text{св рік}}, \text{м}^3$):

$$V_{\text{св міс}} = V_{\text{св}} \times 30 \times 24,$$

$$V_{\text{св рік}} = V_{\text{св}} \times 365 \times 24,$$

де $V_{\text{св}}$ - витрата стічної води, л/с.

Маса важких металів, що надходять протягом одного місяця й одного року в замкнуту водойму ($G_{i \text{ в м міс}}, \text{т}$; $G_{i \text{ в м рік}}, \text{т}$):

$$G_{i \text{ в м міс}} = C_{i \text{ в м}} \times V_{\text{св міс}},$$

$$G_{i \text{ в м рік}} = C_{i \text{ в м}} \times V_{\text{св рік}},$$

де i – [М, РТ, СВ], відповідно, миш'як, ртуть, свинець;

$C_{i \text{ в м}}$ - концентрація важких металів у стічній воді i -го виду, мг/л.

Концентрація важких металів в озері через один місяць і один рік ($C_{\text{оз.вм.міс}}$, мг/л; $C_{\text{оз.вм.рік}}$, мг/л):

$$C_{\text{оз вміс}} = G_{\text{і вміс}} / V_{\text{оз}},$$

$$C_{\text{оз вмік}} = G_{\text{і вмік}} / V_{\text{оз}},$$

де $V_{\text{оз}}$ - об'єм озера, л

Об'єм озера:

$$V_{\text{оз}} = S \times h,$$

де S – площа озера, км²;

h - середня глибина озера, м.

Санітарно-гігієнічна оцінка рівня екологічної небезпеки озера через один місяць і один рік:

$$C_{\text{оз вміс}} = \text{ГДК}_{\text{вміс}}$$

Якщо $C_{\text{оз вміс}} < \text{ГДК}_{\text{вміс}}$ - це безпечно.

Якщо $C_{\text{оз вміс}} > \text{ГДК}_{\text{вміс}}$ - небезпечно для людини, біосфери й навколишнього середовища.

Критерії екологічного суммаційного стану озера через один місяць і один рік:

$$\phi_{\text{міс}} = \Sigma(C_{\text{оз вміс}} / \text{ГДК}_{\text{вміс}}) = (C_{\text{м вміс}} / \text{ГДК}_{\text{м}}) + (C_{\text{рт вміс}} / \text{ГДК}_{\text{рт}}) + (C_{\text{св вміс}} / \text{ГДК}_{\text{св}})$$

$$\phi_{\text{рік}} = \Sigma(C_{\text{оз вмік}} / \text{ГДК}_{\text{вмік}}) = (C_{\text{м вмік}} / \text{ГДК}_{\text{м}}) + (C_{\text{рт вмік}} / \text{ГДК}_{\text{рт}}) + (C_{\text{св вмік}} / \text{ГДК}_{\text{св}})$$

Якщо $\phi_{\text{міс}} < 1$ – безпечно використовувати воду в питних і рекреаційних цілях, якщо $\phi_{\text{міс}} > 1$ - небезпечно.

Розрахунок

1. Вихідні дані (варіант 27):

$S_{\text{оз}} = 35 \text{ км}^2$, $h = 3,5 \text{ м}$, $T = \text{один міс.}, \text{ один рік.}$

Біля озера розташовані підприємства, які використовують воду озера для технічних цілей і скидають стічні води в озеро.

Розрахувати: як буде забруднене озеро через один місяць, один рік.

Витрата стічної води $V_{\text{св}} = 225 \text{ л/с.}$

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						80
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Концентрація сполук металів у стічній воді, мг/л:

$C_{\text{м.}}$ - миш'як = 0,4;

$C_{\text{рт}}$ - ртуть = 0,3;

$C_{\text{св}}$ - свинець = 0,75;

Гранично - допустима концентрація (ГДК) у поверхневій водоймі, мг/л:

- миш'як = 0,006

- ртуть = 0,005;

- свинець = 0,05.

2. Фонд робочого часу:

$$\Phi_{\text{міс}} = 30 \times 24 = 720 \text{ година/міс}$$

$$\Phi_{\text{рік}} = 365 \times 24 = 8760 \text{ година/рік}$$

3. Скидання стічної води протягом одного місяця:

$$\begin{aligned} V_{\text{св міс}} &= V_{\text{св}} \times 30 \times 24 = (225 \text{ л/с} \times 3600 / 1000) \times 720 \text{ година/міс} = \\ &= 583200 \text{ м}^3/\text{міс} \end{aligned}$$

Скидання стічної води протягом одного року:

$$\begin{aligned} V_{\text{св рік}} &= V_{\text{св}} \times 365 \times 24 = (225 \text{ л/с} \times 3600 / 1000) \times 8760 \text{ година/міс} = \\ &= 7095600 \text{ м}^3/\text{рік} \end{aligned}$$

4. Маса важких металів, що надходять в озеро протягом одного місяця:

$$G_{i \text{ в м міс}} = C_{i \text{ в м}} * V_{\text{св міс}}$$

$$G_{\text{м міс}} = 0,4 \text{ мг/л} \times 583200 \text{ м}^3/\text{міс} \times 10^{-6} = 0,2333 \text{ тонн/міс};$$

$$G_{\text{рт міс}} = 0,3 \text{ мг/л} \times 583200 \text{ м}^3/\text{міс} \times 10^{-6} = 0,1750 \text{ тонн/міс};$$

$$G_{\text{св міс}} = 0,75 \text{ мг/л} \times 583200 \text{ м}^3/\text{міс} \times 10^{-6} = 0,4374 \text{ тонн/міс}.$$

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						81
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

5. Визначимо масу важких металів, що надходять в озеро протягом одного року:

$$G_{i \text{ в м рік}} = C_{i \text{ в м}} \times V_{\text{св рік}}$$

$$G_{\text{м рік}} = 0,4 \text{ мг/л} \times 7095600 \text{ м}^3/\text{рік} \times 10^{-6} = 2,8384 \text{ тонн/рік};$$

$$G_{\text{рт рік}} = 0,3 \text{ мг/л} \times 7095600 \text{ м}^3/\text{рік} \times 10^{-6} = 2,1287 \text{ тонн/рік};$$

$$G_{\text{св рік}} = 0,75 \text{ мг/л} \times 7095600 \text{ м}^3/\text{рік} \times 10^{-6} = 5,3217 \text{ тонн/рік}.$$

6. Концентрація важких металів в озері через один місяць:

$$C_{\text{оз в м міс}} = G_{i \text{ в м міс}} / V_{\text{оз}}$$

$$V_{\text{оз}} = S \cdot h = 35 \text{ км}^2 \times 3,5 \text{ м} \cdot 10^9 = 122,5 \times 10^9 \text{ л}$$

Відповідність реальної концентрації важких металів гранично допустимій концентрації:

$$\Psi_{\text{в м}} = C_{i \text{ в м}} / \text{ГДК}_{\text{в м}}$$

$$C_{\text{м міс}} = (0,2333 \text{ тонн/міс} \times 109) / (122,5 \times 10^9 \text{ л}) = 0,00190 \text{ мг/л} < \text{ГДК}_{\text{м}} = 0,006 \text{ мг/л}$$

$$\psi_{\text{м міс}} = 0,32 \text{ ГДК}_{\text{м}}$$

$$C_{\text{рт міс}} = (0,1750 \text{ тонн/міс} \times 109) / (122,5 \times 10^9 \text{ л}) = 0,00143 \text{ мг/л} < \text{ГДК}_{\text{рт}} = 0,005 \text{ мг/л}$$

$$\psi_{\text{рт міс}} = 0,29 \text{ ГДК}_{\text{рт}}$$

$$C_{\text{св міс}} = (0,43748 \text{ тонн/міс} \times 109) / (122,5 \times 10^9 \text{ л}) = 0,00357 \text{ мг/л} < \text{ГДК}_{\text{св}} = 0,05 \text{ мг/л}$$

$$\psi_{\text{св міс}} = 0,07 \text{ ГДК}_{\text{св}}$$

Оскільки реальна концентрація по сполуках миш'яку, ртуті й свинцю не перевищує ГДК, то протягом місяця немає екологічної небезпеки по цих речовинах.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						82
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

7. Концентрація важких металів в озері через один рік:

$$C_{\text{оз в м рік}} = G_{\text{і в м рік}} / V_{\text{оз}}$$

$$C_{\text{м рік}} = (2,8384 \text{ тонн/рік} \times 10^9) / (122,5 \times 10^9 \text{ л}) = 0,02317 \text{ мг/л} > \text{ГДК}_{\text{м}} = 0,006 \text{ мг/л}$$

$$\psi_{\text{м рік}} = 3,862 \text{ ГДК}_{\text{м}}$$

$$C_{\text{рт рік}} = (2,1287 \text{ тонн/рік} \times 10^9) / (122,5 \times 10^9 \text{ л}) = 0,01738 \text{ мг/л} > \text{ГДК}_{\text{рт}} = 0,005 \text{ мг/л}$$

$$\psi_{\text{рт рік}} = 3,475 \text{ ГДК}_{\text{рт}}$$

$$C_{\text{св рік}} = (5,3217 \text{ тонн/рік} \times 10^9) / (122,5 \times 10^9 \text{ л}) = 0,04344 \text{ мг/л} < \text{ГДК}_{\text{св}} = 0,05 \text{ мг/л}$$

$$\psi_{\text{св рік}} = 0,869 \text{ ГДК}_{\text{св}}$$

Оскільки реальна концентрація по сполуках миш'яку та ртуті ГДК на них, то через рік в озері створюється екологічна небезпека, вода непридатна для питних і рекреаційних цілей.

8. Критерії екологічного стану озера через один місяць і рік:

Сумарний вплив металів, що надходять в озеро зі стічними водами:

$$\phi_{\text{міс}} = (C_{\text{м міс}} / \text{ГДК}_{\text{м}}) + (C_{\text{рт міс}} / \text{ГДК}_{\text{рт}}) + (C_{\text{св міс}} / \text{ГДК}_{\text{св}})$$

$$\phi_{\text{міс}} = (0,00378 \text{ мг/л} / 0,006 \text{ мг/л}) + (0,003402 \text{ мг/л} / 0,005 \text{ мг/л}) + (0,01323 \text{ мг/л} / 0,05 \text{ мг/л}) = 0,674 < 1$$

Оскільки $\phi_{\text{міс}} < 1$ немає екологічного ризику для біосфери й людини.

$$\phi_{\text{рік}} = (C_{\text{м рік}} / \text{ГДК}_{\text{м}}) + (C_{\text{рт рік}} / \text{ГДК}_{\text{рт}}) + (C_{\text{св рік}} / \text{ГДК}_{\text{св}})$$

$$\phi_{\text{рік}} = (0,04599 \text{ мг/л} / 0,006 \text{ мг/л}) + (0,041391 \text{ мг/л} / 0,005 \text{ мг/л}) + (0,160965 \text{ мг/л} / 0,05 \text{ мг/л}) = 8,206 > 1$$

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						83
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

Сумарний вплив важких металів, що надходять в озеро через місяць і рік, є небезпечним для здоров'я людини, біосфери й навколишнього середовища.

Тому для зниження рівня екологічної безпеки необхідно встановлювати комплексну систему очищення промислових стічних вод.

Реагентні методи очищення

До них ставляться - нейтралізація кислот і лугів, переклад іонів у малорозчинні сполуки, соосадження домішок розчинами солей.

Нейтралізація

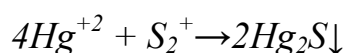
Кислі й лужні стічні води перед випуском у водойму або подачею на біологічне очищення повинні бути нейтралізовані.

Способи нейтралізації стічних вод:

- 1) взаємна нейтралізація кислих і лужних стічних вод;
- 2) нейтралізація реагентами;
- 3) фільтрація через нейтралізаційні матеріали (вапняк $CaCO_3$, доломит $CaCO_3 + MgCO_3$, магнезит).

Метод соосадження

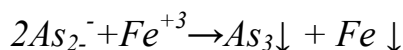
Глибоке очищення стічних вод від іонів ртуті виробляється шляхом осадження у вигляді сульфідів ртуті за реакцією:



Добуток розчинності $Hg_2S = 1.6 \times 10^{-52}$ (практично нерозчинна речовина).

Миш'як - у стічних водах може бути присутнім у складі аніонів тіосолей або кисневмісних аніонів.

Осадження сульфїду миш'яку з одночасним розкладанням тіосолей проводять шляхом обробки стічної води розчином сульфату заліза:



Метод окислювання - використовують для знешкодження СВ, що містять токсичної домішки або для дезодорації погано-пахнучих СВ. Для

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						84
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

знешкодження СВ використовують окислювачі: хлор, гіпохлорит натрію, кальцію, діоксин хлору, озон, кисень.

Метод відновлення - широке застосування одержав для очищення стічних вод від солей хромової кислоти хром Cr^{+6} відновлюється до Cr^{+3} , що у вигляді $Cr(BIH)_3$ виділяють (осаджують) зі СВ. Для відновлення Cr^{+6} використовують солі Fe^{+2} , $NaHSO_3$, SO_2 .

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						85
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У ході підготовки та написання даного дипломного проекту було проаналізовано конструктивні особливості чотиритактного середньообертового двигуна Мак 9М43, проведено аналіз робочого процесу та сучасних напрямів його вдосконалення. В результаті проведеного аналізу було встановлено, що завдяки створенню сучасної концепції фірмою виробником та використанню оригінальних технічних рішень дає можливість двигуну широко застосовуватися на судах.

Проте, завжди актуальною для двигунів внутрішнього згоряння лишатиметься проблема ще більшого зниження витрати палива, та покращення його екологічних характеристик. Особливо гостро ці проблеми виникають на режимах часткових навантажень.

Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є додавання малих домішок водню. Існуюче обладнання дозволяє отримувати його прямо на борту судна, підготовлювати до впорскування та впорскувати безпосередньо у циліндр після закриття впускного клапану. Аналіз конструкції двигуна та його систем показав, що він досить легко може бути переобладнаний для запровадження запропонованого технічного рішення шляхом встановлення спеціальних форсунок. Розрахунки робочого процесу двигуна підтвердили доцільність такої модернізації.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						86
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Pounder, C.C. Msrine diesel engines and gas turbines. – London, DousWoodyard, 2009. – 887 p.
2. Наливайко, В.С. Суднові двигуни внутрішнього згоряння. [Текст]: Методичні вказівки до виконання графіко-розрахункових робіт. / В.С. Наливайко, С.Г. Ткаченко, В.С. Хоменко. – Миколаїв: НУК, 2012. – 72 с.
3. Лукін, А.І. Конструкція суднових двигунів. [Текст]: Навчальний посібник / А.І. Лукін, Миколаїв, УДМТУ, 1999. – 62 с.
4. Пильов, Двигуни внутрішнього згоряння. Том 4. Основи САПР ДВЗ [Текст]: / В.О. Пильов, А.В. Шеховцев. – Х.: «Прапор», 2004. – 336 с.
5. Марченко, А.П. Двигуни внутрішнього згоряння. Том 5. Екологізація ДВЗ [Текст]: / А.П. Марченко, І.В. Пареданов, Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, А.Ф. Шеховцев. – Х.: «Прапор», 2004. – 360 с.
6. Наливайко, В.С. Характеристики двигунів внутрішнього згоряння та споживачів. [Текст]: / В.С. Наливайко, С.Г. Ткаченко, В.С. Хоменко – Миколаїв НУК, 2011. – 100 с.
7. Наливайко В.С. Режими роботи суднових ДВЗ. [Текст]: / В.С. Наливайко, С.Г. Ткаченко – Миколаїв НУК, 2011. – 100 с.
8. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. Автомобільні двигуни [Текст] / Ф.І. Абрамчук, Ю.Ф. Гутаревич, К.Є. Долганов, І.І. Тимченко – 2-е видання. — Київ: Арістей, 2004. — 476 с. — ISBN:966-8458-26-5.
9. Гащук П.М., Миськів Т.Г., Нікіпчук С.В. Автомобільні двигуни. Тепловий та динамічний розрахунок. Навчальний посібник. — Львів: Українські технології, 2006. — 144 с. — ISBN: 966-345-076-2.
10. Крушедольський О.Г. Моделювання робочих процесів транспортних дизелів на експлуатаційних режимах Навчальний посібник. — Харків: УкрДАЗТ, 2006. — 216 с. — ISBN: 966-7593-68-1, Г-848.

					ПННІ НУК 131.61.23.27.ПЗ	Аркуш
						87
Зм.	Арк.	№ документа	Підпис	Дата		

11. Стефановський О.Б. Розрахунок показників автотракторного дизеля і параметрів його систем. Навчальний посібник. — Мелітополь: ТДАТУ, 2018. — 84 с.

12. Дяченко В.Г. Двигуни внутрішнього згоряння: Теорія Підручник для студентів вищих навчальних закладів. За ред. А.П. Марченка. — Харків: НТУ ХПІ, 2008. — 488 с. — ISBN 978-966-593-575-9

13. Пильов В.О., Шеховцов А.Ф. Двигуни внутрішнього згоряння. Серія підручників у 6 томах. Том 4. Основи САПР Підручник. — Харків: Прапор, 2004. — 336 с. — ISBN: 966-8690-03-6

14. Марченко А.П., Рязанцев М.К., Шеховцов А.Ф. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Том 2. Доводка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Підручник. — Харків: Прапор, 2004. — 288 с. — ISBN 966-7880-96-6.

15. Абрамчук Ф.І., Рязанцев М.К., Шеховцов А.Ф. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Том.6. Надійність ДВЗ. Підручник. - Харьков, 2004. 421 с.

16. Марченко А.П., Рязанцев М.К., Шеховцов А.Ф. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Том 1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Підручник. — Харків: Прапор, 2004. — 384 с. — ISBN 966-7880-93-1

17. Марченко А.П., Рязанцев М.К., Шеховцов А.Ф. Двигуни внутрішнього згоряння: Серія підручників у 6 томах. Том 3. Комп'ютерні системи керування ДВЗ. Харків: Видавн. центр НТУ ХПІ, 2004. — 426 с.