

**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 паливної економичності головного двигуна танкера шляхом використання випарного газу.

Виконав:

студент групи 61-ТЕМмаг-22

***Чернишова М.О.***

(підпис)

Керівник роботи:

доцент кафедри ІМ та ТМ, к.т.н., доцент

(посада, науковий ступень, вчене звання)

***Познанський А.С.***

(підпис)

Первомайськ - 2023 р.

## АНОТАЦІЯ

В магістерській роботі розроблені умови по поліпшенню паливної економічності головного двигуна танкера проекту 17120 на номінальному режимі роботи шляхом використання випарного газу. В якості базового був обраний двигун 6ДКРН35/105 виробництва фірми MAN B&W (6L35MC) потужністю 3900 кВт.

В роботі проведені теплові розрахунки головного двигуна. Проведено аналіз паливної системи двигуна. Розглянуто проблеми переводу суднових двигунів на газове паливо та заходи по забезпеченню безпеки. Визначені параметри двигуна при роботі на випарному газі. Спроектована та розрахована системи подачі та впорскування випарного газу. Проведені розрахунки двохпаливної форсунки випарного газу.

У роботі проведено розрахунок приточно-витяжної вентиляції в машинно-котельному відділенні двигуна, запропоновано заходи щодо зниження небезпечних і шкідливих факторів, що впливають на персонал з обслуговування дизеля. Розглянуто питання охорони навколишнього середовища й забруднення, які виникають при експлуатації дизеля.

Магістерська робота виконана українською мовою на 93 аркушах розрахунково-пояснювальної записки. Використано 10 літературних джерел. Графічна частина представлена на 5 кресленнях формату А1.

## **ABSTRACT**

In the master's thesis, the conditions for improving the fuel efficiency of the main engine of the tanker project 17120 at the nominal mode of operation by using vaporized gas were developed. A 6-cylinder two-stroke long-stroke cross-head engine 35/105 manufactured by MAN B&W (6L35MC) with a capacity of 3900 kW was chosen as the base.

Thermal calculations of the main engine were carried out in the work. An analysis of the engine's fuel system was carried out. The problems of switching ship engines to gas fuel and measures to ensure safety are considered. Determined parameters of the engine when working on vaporized gas. Evaporative gas supply and injection systems are designed and calculated. The calculations of the dual-fuel vaporizing gas nozzle have been carried out.

In the work, the calculation of the supply and exhaust ventilation in the machine and boiler room of the engine was carried out, and measures were proposed to reduce dangerous and harmful factors affecting diesel engine maintenance personnel. Issues of environmental protection and pollution that arise during diesel operation are considered.

The master's thesis is written in Ukrainian on 93 sheets of calculation and explanatory notes. 10 literary sources were used. The graphic part is presented on 5 drawings of A1 format.

## ЗМІСТ

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>ВСТУП</b>                                                                                                    | 6  |
| <b>РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУДНА ТА ЙОГО СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ</b>                                        | 8  |
| 1.1 Загальні відомості про судно                                                                                | 8  |
| 1.2 Опис енергетичної установки                                                                                 | 15 |
| 1.3 Опис конструкції головного двигуна                                                                          | 15 |
| <b>РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЙОГО ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ</b> | 20 |
| 2.1 Передумови використання горючих газів в якості палива для суднових двигунів                                 | 20 |
| 2.2 Характеристика газових палив                                                                                | 22 |
| 2.3 Паливні системи газорідних двигунів                                                                         | 39 |
| 2.4 Проблеми переведу суднових двигунів на газове паливо та заходи по забезпеченню безпеки                      | 46 |
| 2.5 Використання VOC газу в якості основного палива на танкерах                                                 | 51 |
| <b>РОЗДІЛ 3. МОДЕРНІЗАЦІЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА MAN B&amp;W 6L35MC ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВИПАРНОГО ГАЗУ</b>           | 54 |
| 3.1 Тепловий розрахунок головного двигуна при роботі на важкому паливі                                          | 54 |
| 3.2 Тепловий розрахунок головного двигуна на VOC газі                                                           | 64 |
| 3.3 Розробка системи подачі та впорскування VOC газу                                                            | 66 |
| <b>РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА</b>                                              | 74 |
| 4.1 Охорона праці                                                                                               | 74 |

|           |      |                 |        |      |                             |  |  |              |      |         |    |
|-----------|------|-----------------|--------|------|-----------------------------|--|--|--------------|------|---------|----|
|           |      |                 |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ   |  |  |              |      |         |    |
|           |      |                 |        |      |                             |  |  |              |      |         |    |
| Зм.       | Арк. | № докум.        | Підпис | Дата |                             |  |  |              |      |         |    |
| Розробив  |      | Чернишова М.О.  |        |      | Пояснювальна<br><br>записка |  |  | Літ.         | Арк. | Аркушів |    |
| Перевірив |      | Познанський А.С |        |      |                             |  |  |              |      | 4       | 93 |
|           |      |                 |        |      |                             |  |  | 61-ТЕМмаг-22 |      |         |    |
| Н. контр. |      | Познанський А.С |        |      |                             |  |  |              |      |         |    |
| Затвердив |      | Нестеренко В.В. |        |      |                             |  |  |              |      |         |    |

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 4.2 Охорона навколишнього середовища            | 81 |
| <b>ВИСНОВКИ</b>                                 | 86 |
| <b>ЛІТЕРАТУРА</b>                               | 87 |
| <b>ДОДАТКИ</b>                                  | 88 |
| 1. Загальний вигляд машинного відділення Ф-А1   |    |
| 2. Поперечний переріз двигуна 6ДКРН 35/105 Ф-А1 |    |
| 3. Схема паливної системи Ф-А1                  |    |
| 4. Схема системи подачі випарного газу Ф-А1     |    |
| 5. Двохпаливна форсунка Ф-А1                    |    |

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 5     |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

## ВСТУП

Постійне зростання вимог до екологічних показників роботи суднових дизельних установок з одного боку і підвищення вартості палив з іншого, змушують розробників суднових дизельних двигунів шукати нетрадиційні підходи до вирішення проблеми скорочення шкідливих викидів і зниження експлуатаційних витрат на паливо.

В даний час більше 40% видобутої нафти переробляють в моторні палива. Близько 50 % зазначеного палива витрачається на наземному, водному і повітряному транспорті, обладнаному двигунами внутрішнього згоряння. За існуючими оцінками на перспективу очікується дефіцит рідкого нафтового моторного палива. Наявні резерви підвищення економічності транспортних ДВЗ не можуть перекрити цей дефіцит тому, що очікуване підвищення експлуатаційної економічності ДВЗ за рахунок їх конструктивного вдосконалення складе не більше 20 %, що вже недостатньо для покриття дефіциту [1].

Дефіцит рідкого нафтового моторного палива, а також високе забруднення повітря продуктами його викликали необхідність пошуку альтернативних палив. Єдиним економічно виправданим таким альтернативним паливом в даний час визнано газове паливо, яке можна застосовувати в якості моторного палива без будь-якої переробки, крім обов'язкової технологічної стадії видобутку і транспорту газу - промислової підготовки. Ресурси газового моторного палива набагато перебивають ресурси рідкого палива.

За своїми властивостями газове моторне паливо перевершує нафтові палива. При застосуванні його в двигунах забезпечуються високі техніко-економічні показники таких машин, так як газ має хороші антидетонаційні якості, сприятливі умови сумішоутворення і широкі межі займання в суміші з повітрям. Мабуть, з цієї причини перші ДВЗ робили для роботи саме на газу [3].

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 6     |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

В якості джерел постачання газовим моторним паливом можна використовувати окремі малі місця добування газу, не включені в систему, а також родовища, що знаходяться на завершальній стадії експлуатації, включаючи й такі, використання яких для видобутку газу стало економічно нераціональним.

Реалізація перелічених передумов за рахунок газу дозволять здійснити перелом у забезпеченні транспорту паливом, зняти обмеження на розвиток морського господарства, що накладаються нестачею важкого і дизельного палива.

Таким чином, є комплекс що визначають широкі перспективи застосування газового палива на морському транспорті.

Мета даної магістерської роботи – розробити умови по поліпшенню паливної економічності головного двигуна танкера проекту 17120 на номінальному режимі роботи шляхом використання випарного газу.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 7     |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

# РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СУДНА ТА ЙОГО СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ

## 1.1 Загальні відомості про судно

Танкер проекту 17120 (рис. 1.1) призначений для перевезення на коротких лініях нафтопродуктів, безпечних хімічних вантажів, дозволених для перевезення на нафтоналивних судах, а також наливних харчових вантажів (рослинної олії, патоки).



Рис. 1.1 – Загальний вигляд танкера проекту 17120

Район плавання – необмежений відповідно до Російського Морського Регістра судноплавства. Мінімальна температура зовнішнього повітря в районах плавання судна складає  $-25^{\circ}\text{C}$ .

Танкер представляє собою самохідне, сталеве, одновинтове, однопалубне судно з баком і ютом, з кормовим розташуванням енергетичної установки, житлових приміщень і постів керування, з подвійним дном,

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 8     |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |



подвійними бортами й одною подовжньою переборкою у діаметральній площині вантажної частини, з носовими обведеннями бульбообразної форми (коефіцієнт бульбообразності 7) і транцевою кормою, з мінімальним надводним бортом.

Танкер спроектовано за Правилами Морського Регістра на клас КМ  Л4 <sup>1</sup> АІ (нафтоналивне, хімовоз-3).

Основні характеристики корпусу судна представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Головні розміри судна

| Параметр                        | Значення |
|---------------------------------|----------|
| Довжина максимальна, м          | 109,00   |
| Довжина між перпендикулярами, м | 102,00   |
| Ширина найбільша, м             | 18,60    |
| Висота борта на міделі, м       | 9,50     |
| Осад по КВЛ, м                  | 7,00     |
| Осад по літню вантажну марку, м | 7,65     |
| Дедвейт при осаді 7,0 м, т      | 7000     |
| Дедвейт при осаді 7,65 м, т     | 8000     |

Подвійне дно та подвійні борта в танковій частині танкера утворюють баластні цистерни загальною місткістю 3240 м<sup>3</sup>, що складає близько 40% місткості вантажних танків. На танкері передбачені десять вантажних танків та два відстійних танки загальною місткістю 8320 м<sup>3</sup>.

Дальність плавання по запасам палива при швидкості ходу 14,2 вузлів та осаді 7,65 м складає 6000 миль.

Автономність плавання по запасам прісної води складає 30 діб, по запасам палива і провізії – 60 діб.

Ширина, висота борта, конструктивний осад і коефіцієнт загальної повноти прийняті на підставі розрахунків і аналізу структури танкерів-

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 9     |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

хімовозів даної групи дедвейту і забезпечують гарні ходові і морехідні якості судна як з повним вантажем так і без вантажу.

Форма обводів корпусу обрана з умов забезпечення швидкісних і морехідних якостей судна при одночасному досягненні найбільшої вантажомісткості.

Швидкість судна на випробуваннях – не менш 14,2 вузла на глибокій воді при осаді 7,00 м, при посадці на рівний киль, при хвилюванні моря не вище двох балів, при силі вітру не більш трьох балів по шкалі Бофорта, при обертанні гребного гвинта з частотою 200 хв<sup>-1</sup>, при відповідній ефективній потужності на валу.

Остійність судна у всіх експлуатаційних випадках завантаження задовольняє «Правилам класифікації і будування морських суден» Регістра РФ для суден необмеженого району плавання.

Непотоплюваність судна забезпечується при завантаженні усіма видами специфікаційних вантажів по осад 7,65 м відповідно до вимог Регістра при затопленні будь – якого одного відсіку(окрім машинного відділення) .

Період бортової качки судна у всіх експлуатаційних випадках завантаження забезпечується в межах 12...14 секунд.

Для забезпечення високих маневрених якостей, що особливо важливо для танкерів-хімовозів, на судні в носовій частині встановлений підрулюючий пристрій тунельного типу упором 58,5 кН.

Для розміщення екіпажу в кількості 20 чоловік передбачені:

- 4 блок – каюти;
- 16 одномісних кают.

Для розміщення лоцманів передбачена одна двомісна каюта.

Житлові і суспільні приміщення сформовані в 3-ярусний блок, відділений від шахти МВ і димоходів. В кожній одномісній і двомісній каютах передбачені спальні, санвузли і душі, а блок – каюти окрім вище

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 10    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

зазначеного мають кабінери. Також на судні є кают-компанія, їдальня, сауна, санітарна каюта.

Житлова трюсунська рубка і машинне відділення розташовані в кормі. Житлова рубка відділена від машинного відділення горизонтальним коффердамом. Навігаційна рубка відділена від машинного відділення коффердамом. Судно має безупинну верхню палубу з підйомом у носовому краї. Весь набір верхньої палуби в танковій частині повернутий назовні. Основний набір орієнтований уздовж судна. Корпус судна розділений на 11 водонепроникних відсіків 6-а поперечними перебірками й однією подовжньою між відстійними танками і бункером запасного палива.

Основний корпус у вантажній частині розділяється на 10 вантажних і 2 відстійних танки і має подвійне дно, подвійні борти, скулові і підпалубні конструкції, верхню палубу з розташованим поверх настилу набором у районі вантажних танків, поперечні перебірки з вертикальними гофрами, з'єднаними з подвійним дном і верхньою палубою трапецеїдальними опорами. Вантажні і відстійні танки - гладкостінні і максимально пристосовані до механізованої мийки. Корпус судна у вантажній частині виконується по подовжній системі набору; нижня палуба, платформи, подвійне дно і борти в машинному відділенні, краї судна – по поперечній. Міцність корпусних конструкцій вантажних танків забезпечує можливість перевезення нафти і нафтопродуктів одночасно до 5 сортів. Діапазон зміни щільності перевезеного вантажу у всіх танках – 0,65...1...1 т/м<sup>3</sup> (для нафтопродуктів) і 1,45 т/м<sup>3</sup> (для хімічних). Конструкції корпусу – цілком зварені з максимальним використанням автоматичного і напівавтоматичного зварювання.

Термін служби встановлюваних механізмів, устаткування, матеріалів і виробів відповідають технічним вимогам на постачання.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 11    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Конструкція корпусу, механізмів, устаткування, встановлених на судні, їхнє виконання і монтаж забезпечують надійне використання судна в заданих умовах експлуатації.

Запаси на корозію корпусних конструкцій, зовнішнього обшивання забезпечують заданий термін служби судна.

Ремонтоздатність елементів судна, пристроїв і устаткування забезпечує пристосованість судна до проведення технічного обслуговування, виконанню усіх видів ремонту. Для забезпечення технічного обслуговування і ремонту передбачені конструктивні і технічні заходи, зокрема:

розміщення механізмів і устаткування забезпечує нормальні проходи, обслуговування, доступ для профілактичних оглядів і ремонту;

агрегатування механізмів і устаткування;

ремонтні площадки в районі механізмів і устаткування і для їхнього розбирання і зборки при ремонті;

кришка розміром у світлі 800×800 мм на капі для виїмки-завантаження механізмів і устаткування чи їхніх частин;

електрогідравлічний вантажний кран для вивантаження – завантаження механізмів і устаткування;

обуха для підвішування талі над механізмами й устаткуванням при їхньому розбиранні і зборці;

комплект запасних частин, що забезпечують безперебійну експлуатацію механізмів і устаткування;

комплект інструментів для виконання профілактичних оглядів і поточного ремонту.

Загальне розташування судна, розташування механізмів і устаткування, устрій площадок для обслуговування і керування, житлові, господарські і санітарно-побутові умови на судні створюють умови

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 12    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

безпечної праці й перебування, що відповідають вимогам діючих правил техніки безпеки, санітарних правил.

Для збереження запасів прісної води передбачена цистерна з нержавіючої сталі.

Освітлення приміщень відповідає санітарним нормам.

У холодний час передбачене опалення житлових і службових приміщень відповідно до санітарних норм.

Для охорони людей передбачене леєрне огороження на палубі висотою 1100 мм, страховочні кінці для роботи.

Для обслуговування сигнально-відмітних вогнів передбачений з'ємний трап з легкого сплаву і скоби для кріплення страховочних поясів.

З метою зниження шкідливого впливу на екіпаж шуму і вібрації передбачені наступні конструктивні заходи:

передбачено шумопоглинальну ізоляцію на підволоці МВ і по перегородці, що розділяє МВ і жилий блок;

передбачаються глушители-іскрогасники на газовихлопних трубопроводах;

у системі вентиляції передбачаються шумопоглинальні патрубки.

Конструкція корпусу, механізмів, устаткування, систем судна задовольняють вимогам по запобіганню забруднення із судів.

Для запобігання забруднення моря при експлуатації проектного судна передбачені наступні заходи:

– збір нафтовмістних вод машинно-котельного відділення здійснюється автономним трубопроводом у цистерну льяльних вод. Для очищення нафтовмістних вод передбачається сепараційна установка пропускною здатністю 4,6 м<sup>3</sup>/год і ступенем очищення до 15 частин на млн. у скиданні;

– для виключення розливу палива по верхній палубі, через повітряні труби паливних цистерн, передбачаються огорожуючі комінгси навколо

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 13    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

повітряних труб і відвід палива в переливну цистерну при можливому переповненні цистерн, а також сигналізація про перелив. У растоку вантажних танків установлюється комінгс, що обмежує розлив по верхній палубі. У випадку можливого розливу нафти по палубі виконується її відвід через розташовані побортно в самих нижніх частинах верхньої палуби шпигати в цистерну збору протічок;

- під вантажними колекторами і прийомними трубами важкого і дизельного палива передбачені піддони. Осушення піддонів виробляється в цистернах збору протічок вантажу. Труби прийому мастила розташовані в спеціальних огороженнях, що обмежують розлив;

- передбачена система автоматичного виміру, реєстрації і керування збором нафтовмістних вод після мийки танків і переносної сигналізації для контролю розділу середовищ «нафта – вода» в відстійно - вантажних танках. Передбачається видача в берегові прийомні спорудження продуктів відстою після мийки танків;

- стічні води від унітазів, санвузлів, устаткування медичних блоків, а також господарсько-побутові води виводяться за борт через установку очищення і знезаражування, встановлену в приміщенні збору й обробки стічних вод;

- передбачена автоматизована установка для спалювання судових відходів і залишків нафти (СП – 10), а також контейнер для збору сміття і відходів;

- передбачається видача пар вантажу на берег при прийманні вантажу.

Кожна цистерна обслуговується окремим насосом для запобігання змішування вод. Передбачаються трубопроводи видачі нафтовмістних трюмних вод з обох бортів, що мають з'єднання міжнародного зразка. Кожух димаря і газовихлопні трубопроводи виведені вище даха рубки.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 14    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

## 1.2 Опис енергетичної установки

Енергетична установка розташована в кормовій частині судна. В якості головного двигуна на даному судні встановлений дизель 6L35MC (6ДКРН35/105) виробництва фірми MAN B&W, що працює на гребний гвинт регульованого кроку і забезпечує при заданій потужності й осаді 7,0 м швидкість ходу судна у повному вантажі 14,2 вуз.

У дизельній установці танкера-хімовоза застосована пряма передача механічної енергії до рушія. До складу прямої передачі входять муфта і валопровід, розташовані в діаметральній площині судна. Гребний вал, який проходить у дейдвудній трубі, забезпечується ущільнювальним сальником, встановлюється на опорних підшипниках.

Для постачання судна електричною енергією передбачається електроенергетична установка в складі:

- трьох автоматизованих дизель-генераторів типу ДГРА 500/1000 потужністю по 500 кВт кожен;
- одного аварійного дизель-генератора типу АДГФ 100/1500 потужністю 100 кВт.

Основні дизель-генератори розташовуються в машинному відділенні, аварійний – у приміщенні аварійного дизель-генератора.

## 1.3 Опис конструкції головного двигуна

Головний двигун – реверсивний малообертовий двотактний довгоходовий крейцкопфний дизель типу 6L35MC (6ДКРН35/105) (рис. 1.2) виробництва фірми MAN B&W; простої дії, з газотурбінним наддуванням, з вбудованим упорним підшипником; розташування циліндрів рядне, вертикальне; правого обертання. Основні характеристики дизеля 6L35MC представлені в табл. 1.2.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 15    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Компоновка дизеля забезпечує вільний доступ до його основних агрегатів через люки в блоці дозволяють оглядати і при необхідності замінити деталі шатуно-поршневої групи, не знімаючи дизель з фундаментної рами.

Двигун забезпечується допоміжними компресорами з електричним приводом, та диффузорним конфігурація вихлопного каналу з кожного циліндра дозволяє використовувати і енергію імпульсу при випуску газу. Газотурбонагнітачі - з валом на шарикопідшипниках, з автономними системами змащування для турбінної і компресорної частин.

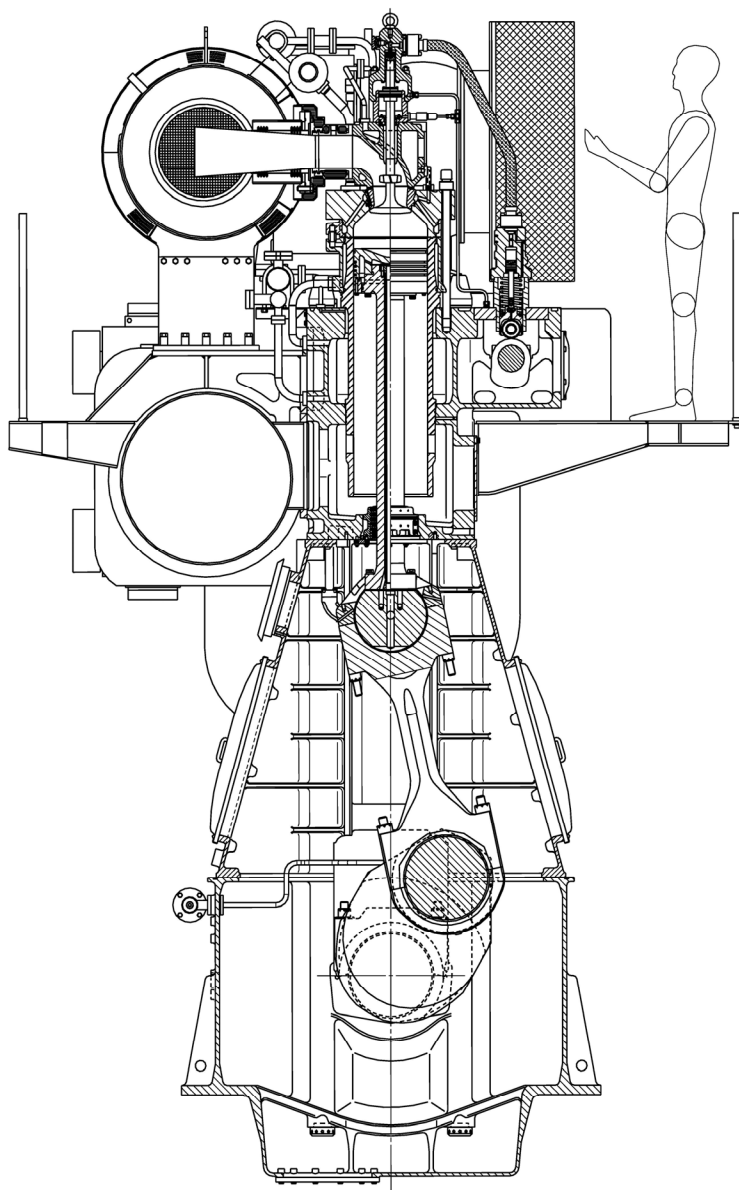


Рис. 1.2 – Повздовжній розріз двигуна MAN B&W L35MC

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 16    |



Таблиця 1.2 – Основні характеристики двигуна 6L35MC

| Параметр                            | Значення |
|-------------------------------------|----------|
| Число циліндрів                     | 6        |
| Діаметр циліндра, мм                | 350      |
| Хід поршня, мм                      | 1050     |
| Частота обертання, хв <sup>-1</sup> | 200      |
| Максимальна потужність, кВт         | 3900     |
| Максимальна тривала потужність, кВт | 3510     |
| Номінальна тривала потужність, кВт  | 3360     |
| Витрата палива, г/кВт×год           | 179      |
| Витрата масла, г/кВт×год            | 0,82     |
| ККД двигуна                         | 0,47     |
| Маса двигуна, кг                    | 66000    |
| Довжина, мм                         | 6560     |
| Ширина, мм                          | 3725     |
| Висота, мм                          | 6080     |

Фундаментна рама двигуна цільна зварна. У піддоні передбачається 2 отвори для стоку мастила з картера в циркуляційну масляну цистерну, розташовану під двигуном. З корми двигуна розташований відсік ланцюгового приводу, де розміщений і вбудований в двигун завзятий підшипник.

Кожен циліндр має по 4 сталевих направляючих крейцкопфа, приварених до конструкції станини. Станина сталева суцільнозварна зі входними дверима в кожен відсік циліндрів і у відсік приводів з боку управління. Відсік приводів має двері і з протилежного боку. Запобіжні клапани картера розташовані у верхній частині станини з боку газовихлопу і 1 з носового торця.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 17    |

Сальник штока ущільнюється - за допомогою 1 грязьового кільця, 2-х складових ущільнювальних і 4-х маслоз'ємних кілець, стягнутих пружинами. Блок циліндрів зібраний в єдиний моноблок на призонних болтах з окремих литих чавунних блоків. Ущільнення втулки забезпечується: у нижній частині - 4-ма гумовими кільцями; у верхній частині в районі сорочки охолодження - 2-ма гумовими кільцями (по одному зверху і знизу сорочки). Перепуск охолоджуючої води з блоку в сорочку охолодження здійснюється по 4-му перепускним патрубках, із сорочки в кришку циліндрів по таким же перепускним трубкам. Кришка циліндра - сталева лита, колпачкового типу зі свердлінням для проходу охолоджуючої води. У кришці розташовані 2 форсунки, вихлопний клапан, індикаторний кран і запобіжний клапан. Кришка кріпиться до блоку циліндра за допомогою гідравлічного кільця на 16 шпильках, що проходять через порожнисту сорочку охолодження верхній частині втулки.

Вихлопний клапан має чавунний литий корпус, шпindel з імпеллера для повертання потоком газів, охолоджуване сідло. Охолоджуюча вода по свердління в кришці проходить через свердління в сідлі близько від посадкового пояса, потім прямує в порожнину охолодження корпусу клапана і виходить з верхньої частини корпусу в відливну трубу. Посадочні пояски шпинделя і сідла зазвичай наплавлені стелітом. В останні роки для наплавлення посадочних пасків використовується більш міцний і більш дорогий сплав - німонік. Відкривається клапан гідравлічним поршнем, закривається, розташованим нижче пневматичним поршнем. Кріпиться клапан до кришки за допомогою 4-х шпильок, затягуються гідравлічними домкратами. Анкерні болти двигунів - сталеві складові, складаються з 2-ух частин, стягують воєдино блок, станину і фундаментну раму. Гайки анкерних болтів затягуються гідравлічно на 90 МПа.

Поршень має сталеву головку і укорочену чавунну спідницю. Поршень охолоджується маслом, яке підводиться і відводиться за

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 18    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

допомогою сверлений в поперечині крейцкопфа і сталевій трубки усередині штока аналогічно використаної схемою в більш ранніх моделях.

Колінчастий вал - сталевий полусоставний, рамові шийки запресовані, кривошипи литі. З корми двигуна до колінчастого валу кріпиться 2-рядна зірочка привода розподільного вала.

Розподільний вал приводиться 2-рядної ланцюгом. Дві проміжні зірочки використовуються для розміщення противаг - таких же, як і з носа двигуна, для урівноваження моментів від сил інерції 2-го порядку. Від розподільного валу наводиться валик лубрикаторами циліндричної мастила і регулятор частоти обертання. З кормового торця до розподільного валу кріпиться валик повітророзподільника. Кулаки паливо і газорозподілу і сполучні фланці ділянок розподільного валу насаджені на вал гарячепресованою посадкою.

Двигун має загальноприйняту систему пуску, що включає в себе головний пусковий клапан, пускові клапани циліндрів і золотниковий повітророзподільник. На ранніх моделях використовувався ротаційний повітророзподільник, проте потім від нього відмовилися. При реверсі двигуна реверсують тільки повітророзподільник і штовхачі ТНВД (за допомогою повітряних циліндрів на кожному насосі).

Мастило подається до двигуна по двом трубам: від нижньої труби - на змазку рамових і упорних підшипників і на відсік приводів, від верхньої до телескопів на змащення головних, крейцкопфних і мотильових підшипників і на охолодження поршнів. Мастило підшипників розподільного вала та живлення гідравлічної системи відкриття вихлопних клапанів забезпечується автономною системою з двома електропривідними гвинтовими насосами. Циліндрове мастило включає в себе лубрикатори з 8 точками мастила на кожному циліндрі з подачею масла на кожному ході поршня.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 19    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

## РОЗДІЛ 2. ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ МОДЕРНІЗАЦІЇ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ЙОГО ПАЛИВНОЇ ЕКОНОМІЧНОСТІ

### 2.1 Передумови використання горючих газів в якості палива для суднових двигунів

Останнім часом усе більш широкого поширення набувають газові двигуни (двигуни, що працюють на газовому паливі) і газорідинні (двохпаливні) двигуни, що працюють на газовому і дизельному паливах. Це пояснюється рядом переваг газоподібного палива в порівнянні з рідким. Хороші антидетонаційні якості газових палив, сприятливі умови сумішоутворення, широкі межі займання в сумішах з повітрям забезпечують високі техніко-економічні показники двигунів [4].

По питомій потужності і паливній економічності кращі сучасні газові і газорідинні двигуни близькі до рідинних, а по токсичності ВГ і зносу мають значні переваги перед ними.

Вживані газові і газорідинні двигуни відрізняються великою різноманітністю способів організації робочих процесів і конструкцій, але їх можна підрозділяти за типом вживаного газового палива, особливостями організації процесів сумішоутворення, займання і згорання, а також за принципом регулювання цих двигунів.

Газові двигуни розрізняють за типом організації процесу займання газоподібного палива. Їх зазвичай створюють на базі серійний двигунів, що працюють на рідкому паливі.

Створені газові двигуни з внутрішнім сумішоутворенням і форкамерно-факельним запаленням. Всі вони працюють на стислому газі.

Пізніше були створені двигуни з системами паливоподачі зрідженого газу.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 20    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

У цих системах зріджених газ спочатку перетворювався в газоподібний стан, а потім змішувався з повітрям в газоповітряному змішувачі, встановленому у впускному трубопроводі, тобто організовувалося зовнішнє сумішоутворення (у пристроях змішувачів, схожих за принципом роботи з карбюраторами, забезпечуючи тими ж засобами необхідний склад суміші на всіх режимах).

При цьому були розроблені системи паливоподачі з кількісним, якісним і змішаним регулюванням газових двигунів.

Займання газоподібного палива в камері згорання (КЗ) дизеля можливо від додаткової свічки запалення (форкамерно-факельне запалення) за рахунок теплоти стискування газоповітряної суміші і від запальної дози дизельного палива.

Газові двигуни з форкамерно-факельним запаленням є значно складнішими, ніж двигуни із зовнішнім сумішоутворенням, і в даний час не знайшли широкого вживання.

Безпосереднє використання газоподібних палив в дизелях без додаткової свічки запалення можливо лише при мірі стискування 22 і вище, що обумовлене високою температурою самозаймання цих палив. Тому переважного поширення набули газодизелі, в яких в кінці такту стискування газоповітряної суміші здійснюється уприскування дози дизельного палива. Причому запальна доза залежить від особливостей газодизеля (його розмірності, рівня форсування, властивостей газоподібного палива) і може вагатися в широких межах (від 5 до 50%).

При конвертації дизеля в газодизель потрібне мінімальне переобладнання двигуна, що полягає в установці газоповітряного змішувача у впускний трубопровід з системою регулювання подачі газу при зміні режиму (якісне регулювання) навантаження і деякої конструктивної модернізації регулювальника подачі запальної дози дизельного палива.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 21    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Газодизелі з подачею запальної дози дизельного палива розроблені для суднових, дизель-генераторних і транспортних установок, для використання на газоперекачуючих станціях.

## 2.2 Характеристика газових палив

### Гази, які використовуються в газодизельних двигунах

Горючі гази, вживані як палива в газодизельних двигунах, можна підрозділити на два основні види: стислі і зріджені. До першого виду палив відносяться горючі гази, що піддаються стискуванню при високому тиску (близько 20,0 МПа), до другого - гази, що мають високу критичну температуру і що зріджуються при звичайній температурі й відносно невисокому тиску (до 1,5~2,0 МПа). Гази першого виду підрозділяють на висококалорійні (з нижчою теплотою згорання  $H_u > 23000$  кДж/м<sup>3</sup>), середньокалорійні ( $H_u = 15000-23000$  кДж/м<sup>3</sup>) і низькокалорійні ( $H_u < 15000$  кДж/м<sup>3</sup>).

До висококалорійних відносяться природні гази, що отримуються зі свердловин газових і газоконденсатних родовищ, а також нафтові гази - метаностанові фракції газів, що отримуються зі свердловин попутно з нафтою й при її переробці. Крім того, деякі з середньокалорійних газів, розглянутих нижче, після спеціальної обробки також володіють високою калорійністю.

Основним компонентом природних газів є метан  $CH_4$ , вміст якого складає 95-99%. В дуже невеликій кількості в них присутні також етан  $C_2H_6$ , пропан  $C_3H_8$ , бутан  $C_4H_{10}$ , пентан  $C_5H_{12}$  і вищі вуглеводні. Крім того, ці гази містять азот і вуглекислий газ (1-4%). Відносна щільність газів вагається в межах 0,56 - 0,58, теплота згорання таких палив складає 34000-35600 кДж/м<sup>3</sup>, а тепловий еквівалент дорівнює 1,25-1,35.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 22    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Гази, що добуваються з газоконденсатних родовищ, в основному складаються з метану, кількість якого вагається в широких межах. Відносна щільність їх складає 0,53-0,90, а вміст метану - 63-95%.

У метаноетанових фракціях попутних нафтових газів, що отримуються при видобутку нафти та її прямій перегонці, кількість етану зростає до 30-60% від кількості метану. У метаноетанових фракціях газів деструктивної переробки нафти, особливо термічного крекінгу, окрім  $\text{CH}_4$  і  $\text{C}_2\text{H}_6$  з'являються в значній кількості  $\text{H}_2$  і прості алкени, зокрема етен  $\text{C}_2\text{H}_4$ . У цих газах вміст вуглеводнів з двома атомами вуглецю досягає 40-60% і більш від вмісту  $\text{CH}_4$ . У метаноетанових фракціях газів, що отримуються при видобутку і переробці нафти, присутність більш високомолекулярних вуглеводнів (з  $\text{C}_3$  і вище) залежить від якості проведеного фракціонування і вагається у відносно широких межах (від доль відсотка до декількох відсотків). Як домішки в нафтових газах присутні  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{N}_2$ , а також органічні похідні останнього і пари води.

До середньокалорійних газів відносяться коксовий і світильний гази, що отримуються з кам'яного вугілля в результаті його газифікації. Від висококалорійних ці гази відрізняються великим вмістом водню  $\text{H}_2$  (25-50%) і меншим вмістом метану (15-35%). Оскільки теплота згорання одиниці об'єму водню менша, ніж метану (відповідно 9372 і 35797 кДж/м<sup>3</sup>), ці гази відрізняються меншою теплотою згорання. Крім того, до складу коксового і світильного газів входить в досить великій кількості (10-20% і більш)  $\text{CO}$ , що має об'ємної теплоти згорання  $\text{H}_2$ , лише трохи більшу (12029 кДж/м<sup>3</sup>), ніж у водню. Кількість же азоту  $\text{N}_2$  і його похідних в коксовому і світильному газах значно вища (10-20% і більш), ніж у висококалорійних газах. У цих газах в невеликих кількостях присутні також  $\text{CO}_2$  (3-6%),  $\text{O}_2$  (до 1%),  $\text{H}_2\text{S}$  і пари води.

Для підвищення теплоти згорання коксового і світильного газів до рівня висококалорійних вони можуть бути піддані збагаченню (метанізації).

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 23    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

При метанізації газів  $\text{CO}$  і  $\text{H}_2$  у присутності каталізатора ( $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$  і ін.) звертаються в метан; одночасно віддаляються сірчисті з'єднання, кисень, органічні сполуки азоту та інші шкідливі домішки [5].

До середньокалорійних відносяться також газу полуконсервування (40-50%  $\text{CH}_4$ , 5~10%  $\text{H}_2$ ,  $H_u = 25000$  кДж/м<sup>3</sup>) і побічні газоподібні продукти виробництва синтетичного каучуку, що містять окрім метану також нескінченні газоподібні вуглеводні.

До низькокалорійних відносяться доменний (колонічний) і силосний (генераторний) газу. Доменний газ виробляється як побічний продукт технологічного процесу на металургійних заводах. Генераторні газу отримують шляхом високотемпературної газифікації корисних копалин органічного походження (торф, бурі вугілля та ін.) і біомаси (дерева, відходи сільськогосподарського виробництва, водорості та ін.). Основним горючим компонентом цих газів є оксид вуглецю  $\text{CO}$  (25-30%). Окрім горючої частини, ці газу містять в дуже великій кількості (до 65% і більше) негорючі компоненти, серед яких  $\text{N}_2$  (до 50% і більше) і  $\text{CO}_2$  (до 10-15% і більше). Тому теплота згорання таких газів дуже невелика (3800-5000 кДж/м<sup>3</sup>). Проте при хорошому очищенні і збагаченні газу, отриманий з біомаси, має  $H_u = 30000-35000$  кДж/м<sup>3</sup> і не поступається по цьому показнику природному газу.

Проводяться дослідження по вивченню придатності біогазу для використання в газодизелях. Біогаз отримують з органічних відходів методом бродіння. Біогаз на 40-80% за об'ємом складається з метану і на 20-55% - з вуглекислого газу. У невеликих кількостях, до 2%, в біогазі містяться пари води, до 3% - сірчистий водень і менше 1% - азот і водень.

Основним паливом залишаються природні газу, що добуваються зі свердловин газових і газоконденсатних родовищ. Після очищення від небажаних домішок і збагаченні (при необхідності) з природних газів

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркус |
|    |       |          |        |      |                           | 24    |
| Зм | Аркус | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |



отримують газоподібні палива, що заправляються в балони під високим тиском.

Основним компонентом стислих природних газів є метан, вміст якого не має бути нижче 90% для газу марки А і 85% - для марки Б. Вміст в них важчих вуглеводнів обмежено з метою виключення утворення відкладень в агрегатах газової апаратури. Вміст негорючих складових ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ) також обмежений, оскільки їх велика концентрація в газоподібних паливах знижує теплоту згорання. Оскільки при дроселюванні газу, що знаходиться під високим тиском, його температура значно знижується і можливе виділення з газу кристалів криги, щоб уникнути закупорки кригою елементів системи паливоподачі виробляється ретельне обезводнення газу. Лімітується також вміст в газі корозійно-агресивних речовин - сірки і її з'єднань.

Метан і багаті їм горючі гази можна використовувати як паливо для транспортних двигунів не лише в стислому вигляді, але також і зрідженому при низькій температурі (нижче  $-162^{\circ}C$ ) і атмосферному тиску. Вживання зрідженого природного газу дозволяє значно підвищити енергоємність цього вигляду палива, але ускладнено рядом обставин. Вартість зрідженого метану значно вища, ніж компримірованого, а зберігання складніше: при поводженні з рідиною, що має температуру нижче  $-162^{\circ}C$ , потрібні особливі запобіжні засоби. Крім того, при зберіганні і транспортуванні зрідженого метану неминучі втрати унаслідок випару, що досягають 7,2-7,5% в добу. Це не лише приводить до втрат палива, але і збільшує пожаро- і вибухонебезпеку. Тому зріджений природний газ може отримати вживання на транспорті при здешевленні зріджування метану й удосконаленні методів його зберігання і транспортування.

В порівнянні із зрідженими природними газами (метаном) пропан-бутанові фракції, що мають відносно високі критичну температуру і температуру кипіння, зріджуються при нормальній температурі і порівняно

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 25    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

невисокому тиску (близько 1,5 МПа). Деякі фізико-хімічні властивості цих палив, що нормуються ДСТУ 20488-80 і ДСТУ 27578-87.

Принципово можливе використання як паливо водню, аміаку, ацетилену і ряду інших газів. Однією з основних проблем, стримуючих вживання цих газів на транспорті, є складність і нерентабельність їх здобуття і зберігання в умовах експлуатації.

Найбільший інтерес викликає використання водню як паливо для дизелів. Водень характеризується високою масовою теплотою згорання, не утворює шкідливих речовин в продуктах згорання і має величезну сировинну базу. Широкі концентраційні межі займання воднево-повітряних сумішей (4~75% (об.)) дозволяють забезпечити оптимальні умови його згорання з позиції паливної економічності, показників динаміки процесу згорання, токсичності ВГ. Основна проблема використання водню як моторне паливо пов'язана з його зберіганням. Температура кипіння водню рівна 252,8°C. Тому зберігати його на транспортному засобі можна в газоподібному вигляді при звичайних температурах і високому тиску, в зрідженому вигляді при температурах нижче за його температуру кипіння або з використанням проміжного носія. Для експлуатації найбільш раціональне використання проміжного носія водню. Такими носіями є гідриди металів (магнію, ванадію, заліза та ін.) і їх сплави. Водень в них зберігається в хімічно зв'язаному стані і при необхідності витягується із з'єднання при термічній, хімічній або термохімічній діях. Проте в даний час роботи по переведенню дизеля на водень доки не вийшли із стадії окремих лабораторних досліджень.

Можливість використання газоподібного палива в двигунах внутрішнього згорання визначається його фізико-хімічними властивостями.

### **Фізико-хімічні властивості газових палив**

Найбільш важливими критеріями придатності газів як паливо в газових і газодизельних двигунах є їх детонаційна стійкість і схильність до

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           |       |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 26    |

самозаймання в камері згорання (КЗ) дизеля, теплотворна здатність газів, вміст в них шкідливих речовин і механічних домішок, фізичні властивості зріджених газів (тиск насиченої пари, коефіцієнт об'ємного розширення, щільність, в'язкість і стисливість рідкої фази) та ін.

Важливою властивістю газоподібних палив є антидетонаційна стійкість, що оцінюється октановим і метановим числами. Велика частина компонентів газоподібних палив мають вищі ОЧ, ніж автомобільні бензини, тому в газових двигунах можна використовувати на 20~25% велику міру стискування і реалізувати вищий термодинамічний ККД, ніж в бензинових.

Метанове число (МЧ) характеризує антидетонаційні властивості палив, що знаходяться за нормальних умов в газоподібному стані. Метан є дуже стійким до детонації газом, і його МЧ прийняте рівним 100. Водень, навпаки, володіє у край низькими антидетонаційними властивостями, і його МЧ прийняте рівним 0. Метанові числа деяких індивідуальних вуглеводнів – компонентів стислих і зріджених газів. Оскільки вуглекислий газ і азот термостійкі, їх наявність у великих кількостях в горючих газах підвищує МЧ. Наприклад, МЧ природного газу складає 70-100, копальневого газу – 100-120, каналізаційного газу (біогазу) – 120-135, газу в сховищах відходів, що містить максимальну кількість  $\text{CO}_2$  і  $\text{N}_2$  - 130...150. Виходячи з ефективності використання в двигунах внутрішнього згорання з примусовим займанням різних газів, запропонована наступна орієнтовна оцінка їх придатності залежно від МЧ. > 100 – дуже хороші; 85-100 – хороші; 70-85 – придатні; 55-70 – важковживані; < 55 – у край важковживані. Використання в двигунах газів з низькими значеннями МЧ, наприклад, коксового газу (МЧ 30-40) або суміші пропану і бутану (МЧ 20-35), вимагає внесення відповідних змін до регулювання двигуна, а інколи і в його конструкцію (зміна міри стискування, форми КЗ та ін.). Так, суміш пропану і бутану знайшла вживання як паливо в автомобільних двигунах, але їх

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 27    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

потужність в цьому випадку виходить меншою, ніж при використанні газів, стійких до детонації.

При використанні газових сумішей з високими МЧ в газодизельних двигунах досить високі потужністю показники, паливна економічність і показники токсичності ОГ можуть бути досягнуті при збереженні незмінної міри стискування і займанні від запальної дози дизельного палива. Природні гази, МЧ, що мають, від 70 до 100, використовують лише в газодизельних двигунах з подачею запальної дози дизельного палива. Застосовні як паливо для таких двигунів нафтові гази з МЧ від 60 до 90. При використанні в дизелях газових сумішей з МЧ менше 55 (суміш пропану і бутану), що мають знижену термічну стійкість, можлива робота дизеля без запальної дози дизельного палива. Для дизелів, що працюють на термостійких природних газах, запальна доза дизельного палива складає не менше 30% від загальної його витрати.

Слід також відзначити, що в газових двигунах займання і стійке горіння газоподібних палив можливе при вищих, ніж в бензинів, коефіцієнтах надлишку повітря  $\alpha$ . Так, при згоранні бензинів гранично допустимий діапазон зміни  $\alpha$  складає 0,3-1,75, для природного газу він дорівнює 0,65-2,00, а для пропану – 0,4-1,7. Тому газоподібні палива більшою мірою, чим бензини, придатні до роботи двигуна на бідних сумішах, і їх можна спалювати з більшою паливною економічністю.

Розглянуті властивості газоподібних палив більшою мірою характеризують можливість їх використання в бензинових двигунах з примусовим займанням, чим в дизельних двигунах. Одним з найважливіших критеріїв придатності газів як паливо в дизельних двигунах є їх ЦЧ.

У легких вуглеводневих газів (метан, етан та ін.) ЦЧ = 3~8, а температура їх самозаймання складає 650-700°C. Тому спалювання природного газу в дизельних двигунах без додаткового джерела займання (свічка запалення, запальна доза дизельного палива) теоретично можливо

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 28    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

при значному збільшенні міри стискування (у гіпербарних двигунах), але практично важкоздійсненна. Отже, більш переважні в цьому випадку зріджені пропан-бутанові суміші, ЦЧ 16-25, що мають, і температуру самозаймання 550-600°C. Їх спалювання по дизельному циклу із займанням від стискування можливо при мірах стискування 22 і вище або при використанні інших методів підвищення температурного рівня повітряного заряду і деталей КС.

Пропан і бутан мають вищу в порівнянні з дизельними паливами термічну стабільність, що приводить до значного збільшення тривалості передполум'яних реакцій, тобто збільшенню періоду затримки займання (ПЗЗ). Дослідження, проведені на віхрекамерном дизелі 1Ч10,5/13 з теплоізолюваною вихровий КЗ і зменшеним УОВТ, показали, що стійке займання пропаноповітряної суміші можливо лише на режимах, близьких до номінального. При використанні в аналогічних умовах бутану його стійке займання виявилось можливим практично на всіх експлуатаційних режимах роботи дизеля. Проте відмічено жорсткіше згорання бутаноповітряної суміші. На номінальному режимі ПЗЗ у вихровій і основній КЗ склав відповідно 1,17 і 1,33 мс при роботі на дизельному паливі і 2,08 і 1,9 мс при роботі на бутані, тобто при роботі на бутані спостерігається початкове займання суміші в основній КЗ. Подальший процес згорання бутаноповітряної суміші супроводиться більшими, ніж при використанні дизельного палива, значеннями максимального тиску згорання  $p_z$  і максимальній швидкості наростання тиску відповідно на 12 і 14,5%.

ЦЧ пропан-бутанових сумішей залежить від вмісту в них цих двох вуглеводнів. Чистий бутан має ЦЧ, рівне 25, пропан - 16. У сумішах ЦЧ змінюється у вказаних межах практично по лінійному закону (рис. 2.1, а). Одним з шляхів поліпшення самозаймання пропан-бутанової суміші в дизелі є введення в її склад деякої кількості дизельного палива. На рис. 2.1 б

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 29    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

заштрихована площа, ув'язнена між кривими 1 і 2, відповідає ЦЧ різних по складу сумішей бутану з пропаном і дизельним паливом.

Оскільки для сучасних транспортних дизелів, не пристосованих до роботи на різних паливах, мінімально допустимим для нормального протікання робочого процесу є ЦЧ, рівне 40, а на паливах з ЦЧ 25-30, пуск холодного двигуна надзвичайно утруднений, надійна робота дизеля на паливній суміші забезпечується при вмісті в ній 60-85% (об.) дизельного палива і 15-40% (об.) пропан-бутанової суміші (див. рис. 2.1, б). Вміст дизельного палива в суміші до 10% (об.) дозволяє збільшити її ЦЧ лише до 22-29 (залежно від вмісту бутану). Тому такий спосіб поліпшення самозаймання пропан-бутанової суміші є недостатньо ефективним.

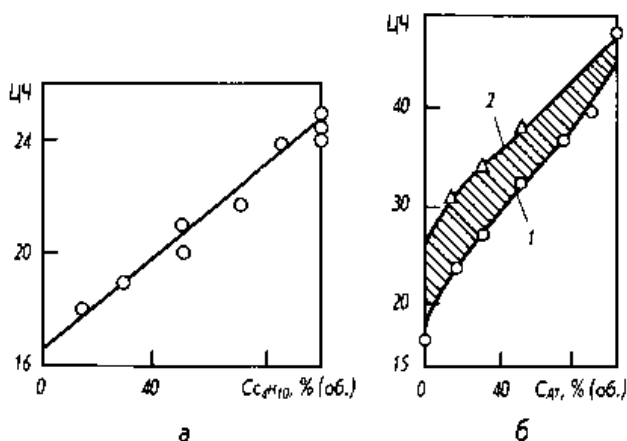


Рис. 2.1 – Залежність цетанового числа зріджених газів та їх сумішей з дизельним паливом від їх складу: а – суміш пропана та бутана; б – суміші пропана (1) та бутана (2) з дизельним паливом;  $C_{C_4H_{10}}$  – концентрація бутана в суміш;  $C_{дт}$  – концентрація дизельного палива

Ефективнішим шляхом поліпшення самозаймання зріджених газів є введення в них присадок, що інтенсифікують горіння. При додаванні в стандартне дизельне паливо 1-1,5% (об.) такої присадки їх ЦЧ збільшується на 6-12 одиниць. Такий же приріст ЦЧ пропан-бутанової суміші можливий при введенні в неї 40-50% (об.) дизельного палива (див. рис. 2.1, б). Як присадки, ЦЧ пропан-бутанової суміші, що підвищують, застосовують

бутілнітрат, гідропероксид кумолу та ін. Введення в паливну суміш 1-1,5% присадок підвищує її ЦЧ на 5-10 одиниць (рис. 2.2, а).

У зв'язку з тим, що введення дизельного палива в паливну суміш необхідне для мастила деталей паливоподаючої апаратури, мінімальна кількість його обмежується, а додаткове поліпшення самозаймання суміші досягається введенням відповідних присадок. Так, додавання в пропан-бутанову суміш 15% (об.) дизельного палива підвищує її ЦЧ на 8 одиниць, а додаткове введення 1-1,5% (об.) бутілнітрата збільшує його ще на 6-8 одиниць (рис. 2.2).

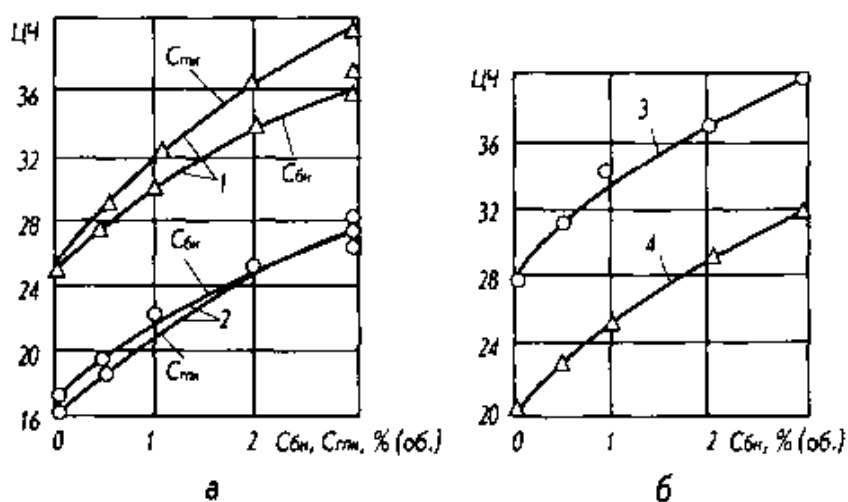


Рис. 2. 2 – Залежність ЦЧ зріджених газів і їх сумішей з дизельним паливом від вмісту присадки: 1 - бутан; 2 - пропан; 3 - суміш бутан + пропан + 15% (об.) дизельного палива; 4 - суміш бутан + пропан; C<sub>бн</sub> - концентрація бутілнітрата; C<sub>гпк</sub> - концентрація гідропероксида кумолу.

Одним з найбільш істотних недоліків вживання газоподібних палив в газових двигунах є зменшення їх потужності, обумовлене в основному меншою теплотворною здатністю цих палив в порівнянні з рідкими нафтовими. Це відноситься в першу чергу до двигунів без наддуву. Так, нижча теплота згорання природного газу складає 33000-37000 кДж/м<sup>3</sup>, пропану - 91250 кДж/м<sup>3</sup>, ізомерів бутану - не менше 115000 кДж/м<sup>3</sup>, але для згорання 1 м<sup>3</sup> вказаних газових палив потрібний відповідно 9,65; 23,8 і

30,9 м<sup>3</sup> повітря. Тому подається в циліндри двигуна газоповітряна суміш стехіометричного складу має теплоту згорання 3230 кДж/м<sup>3</sup> для природного газу, 3460 кДж/м<sup>3</sup> для пропану і 3410 кДж/м<sup>3</sup> для бутану.

Проведені дослідження газового двигуна з робочим об'ємом циліндра  $V_h$  - 12 л без наддуву, що працює на газоповітряних сумішах стехіометричного складу ( $\alpha = 1$ ) на швидкісному режимі  $n = 1000$  хв<sup>-1</sup>, показали, що при  $H_u > 15000$  кДж/м<sup>3</sup> теплотворна здатність газоповітряних сумішей і потужність двигуна міняються трохи при зміні виду газового палива (рис. 2.3). Так, при переведенні двигуна з природного газу на біогаз, а потім і на світільний газ, що відповідає зниженню теплотворної здатності газу з 35500 до 17000 кДж/м<sup>3</sup>, теплотворна здатність газоповітряної суміші збереглася на рівні 3300 кДж/м<sup>3</sup>, а циліндрова потужність двигуна зменшилася всього з 82 до 78 кВт. При використанні як паливо генераторного газу з  $H_u = 5000$  кДж/м<sup>3</sup> ці характеристики знижуються відповідно до 2300 кДж/м<sup>3</sup> і 52 кВт/цил. Тому робота двигуна на низькокалорійних газах вкрай небажана.

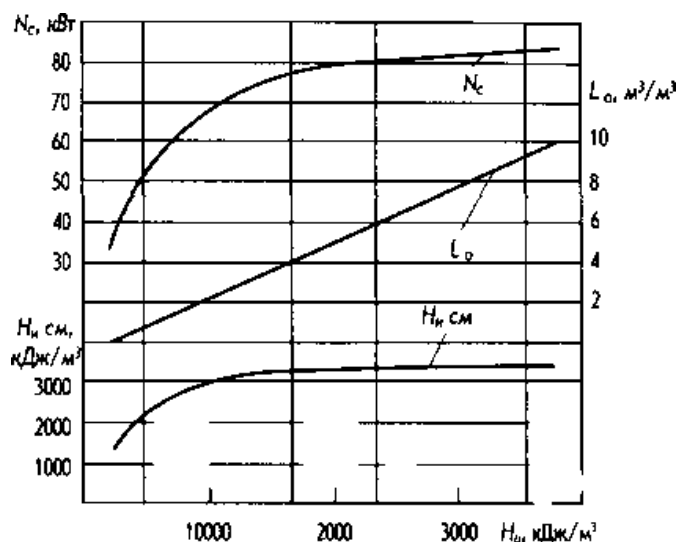


Рис. 2.3 – Залежність теплотворної здатності газоповітряної суміші  $H_{icm}$  теоретично необхідної для згорання 1 м<sup>3</sup> палива кількості повітря  $L_0$  і середній ефективній потужності  $N_e$  газового двигуна, що працює при  $n = 1000$  хв<sup>-1</sup> і  $\alpha = 1$  від теплотворної здатності газу  $H_u$



Зменшення потужності двигуна, що працює на газовому паливі, можна уникнути при вживанні турбонаддува і внутрішнього сумішоутворення (якісного регулювання двигуна). Найпростіше це можна здійснити в газодизельних двигунах, в яких внутрішнє сумішоутворення дозволяє подавати в КЗ необхідну кількість газового палива, а турбонаддув забезпечує подачу в циліндри двигуна необхідного повітряного заряду. Тому в цих двигунах можливе здобуття потужності, в 1,3-1,4 разу, що перевищує потужність двигуна, який працює на штатному дизельному паливі, тобто теплотворна здатність газу не є критерієм обмеження потужності газодизельних двигунів.

Вживання газових палив в газових і газодизельних двигунах можливо лише при обмеженому вмісті в них шкідливих речовин і механічних домішок. До вказаних належать ті, що містяться в газі волога, сірководень та інші сірчисті з'єднання, а також хлор і фтор. Вміст в газах вказаних речовин або їх продуктів згорання може привести до труднощів в організації ефективного робочого процесу, зниженню заданих потужностних і екологічних показників, зменшенню терміну служби деталей двигуна і змащувального масла.

Для зменшення зносу деталей двигуна необхідно забезпечити очищення газу від пилу та інших механічних домішок. У транспортних установках забрудненість газоповітряної суміші досягає  $0,15 \text{ г/м}^3$ . Фірма «Дейтц» (ФРН) допускає вміст пилу в газах, що виникають при зберіганні і переробці відходів, до  $0,025 \text{ г/м}^3$ . Причому допустимий вміст механічних домішок в газі залежить від його теплотворної здатності, яка обернено пропорційна витраті газу. Так, для газів з низькою теплотворною здатністю (наприклад, генераторний газ) вміст механічних домішок обмежується значенням  $0,01 \text{ г/м}^3$ , тоді як для природного газу воно може складати  $0,05 \text{ г/м}^3$ .

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 33    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Окрім розглянутих фізико-хімічних властивостей газоподібних палив при оцінці можливості їх використання в газових двигунах застосовують і ряд інших параметрів: теплоту випару, теплоємність, схильність до нагароутворення і т. д. Окремо слід розглянути фізичні властивості зріджених газів (пропан-бутанових сумішей), подача яких в КЗ дизеля в рідкій фазі принципово можлива штатною паливоподаючою апаратурою дизельних двигунів (при деякій її модифікації). Найбільш важливими з цих властивостей, такими, що роблять значний вплив на процес паливоподачі, є тиск насиченої пари газів, їх щільність, в'язкість і стисливість.

Зріджені гази можуть подаватися в циліндри двигуна в газовій і рідкій фазах. У першому випадку паливо поступає до двигуна під тиском пари газу в балоні, тому величина цього тиску має важливе значення. Не менш значимий цей параметр і при подачі газового палива в КЗ дизеля в рідкій фазі штатним ПНВТ дизеля. В цьому випадку високий тиск насиченої пари може привести до утворення пароповітряних пробок в лінії низького тиску системи паливоподачі й порушенню її нормальної роботи.

Для надійної подачі палива в газовій фазі в КЗ двигуна в балоні із зрідженим газом має бути надлишковий тиск не менше 0,035-0,05 МПа в широкому діапазоні температур навколишнього повітря. Зріджені гази зберігаються в балонах, розрахованих на порівняно невеликий тиск (близько 1,6 МПа), тому обмежується і максимальний тиск насиченої пари.

Вуглеводні, що входять до складу зріджених газів, значно розрізняються по тиску насиченої пари (рис. 2.4), що дозволяє виробляти зріджені гази, відповідні порі року і кліматичним умовам вживання. Тиск насиченої пари пропан-бутанових сумішей залежно від концентрації компонентів може змінюватися в діапазоні, обмеженому кривими 4 і 6 на рис. 2.4. Зріджений газ, пропан (більше 70%), що містить в основному, добре відповідає вимогам зимової експлуатації. У літній період необхідно збільшувати вміст в суміші бутану.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 34    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

При переводі дизеля з дизельного палива на зріджений газ, що подається в рідкій фазі в КЗ паливним насосом високого тиску, спостерігаються зменшення коефіцієнта подачі ПНВТ і зниження масової циклової подачі палива (ЦПП), обумовлені високою випаровуваністю зрідженого газу, його меншою щільністю і в'язкістю і більшою стисливістю.

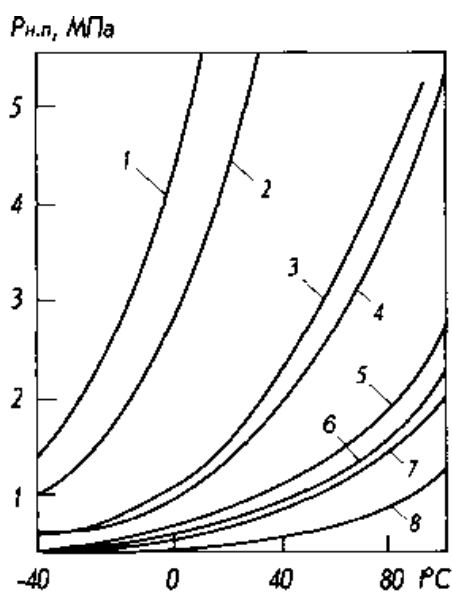


Рис. 2.4 – Залежність тиску насиченої пари вуглеводнів, що входять до складу зріджених газів, від температури: 1 – етилен; 2 – етан; 3 – пропілен; 4 – пропан; 5 – ізобутан; 6 – н-бутан; 7 – бутілен; 8 – пентан

Зріджений газ легко переходить в газоподібний стан при падінні тиску в процесі наповнення надплунжерного простору ПНВТ, внаслідок чого воно заповнюється сумішшю рідкої і парової фаз газового палива. Наявність парової фази призводить до зниження коефіцієнта подачі, оскільки частина активного ходу плунжера витрачається на стискування її до тиску конденсації, що призводить до зниження ЦПП і навіть виключення подачі. Уникнути цього можна шляхом підвищення тиску палива в лінії низького тиску - тиску підкачування, що забезпечує підвищення швидкості вступу палива в надплунжерную порожнину і мінімізацію парової фази.

Важливою для експлуатації особливістю зріджених газів є їх відносно високий коефіцієнт об'ємного розширення. Так, щільність рідкого пропану

при 0°C рівна 530 кг/м<sup>3</sup>, а при 50°C - 460 кг/м<sup>3</sup>, тобто його питомий об'єм зростає на 15,4%. Це приводить до необхідності наявності великого (до 10-15%) вільного об'єму в паливних балонах. При експлуатації цей об'єм заповнений парами вуглеводнів, що входять до складу зріджених сумішевих палив. Проте відбір газового палива необхідно організувати в рідкій фазі. Тривала робота двигуна з відбором палива з вільного об'єму недопустима, оскільки це приводить до переохолодження палива (із-за витрат теплоти на випар) і нерівномірної витрати компонентів, що входять в його склад. В першу чергу витрачаються компоненти, що володіють найбільшим тиском насиченої пари, - пропан і пропилен. Це приводить до зміни властивостей зріджених сумішей і може викликати порушення роботи паливоподачі системи.

В порівнянні з дизельним паливом зріджений газ має меншу кінематичну в'язкість (рис. 2.5), що приводить до збільшення витоків палива в ПНВТ і форсунках і погіршенні умов роботи прецизійних пар паливоподавчої апаратури. Для запобігання підвищеному зносу плунжерних пар, нагнітальних клапанів і розпилювачів форсунок, обумовленого меншою в'язкістю зрідженого газу (близько 0,3 мм<sup>2</sup>/с, тобто в 10-20 разів менше, ніж в дизельного палива), в зріджений газ вводять 5-10% (об.) дизельного палива або моторного масла.

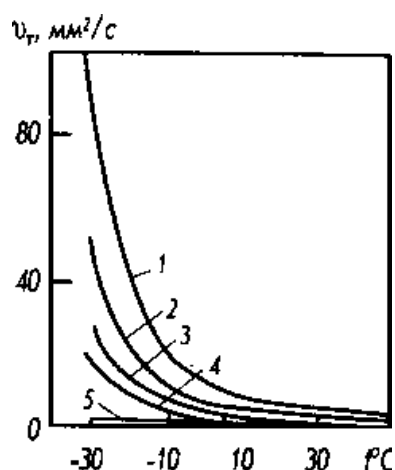


Рис. 2.5 – Залежність в'язкості паливних сумішей від температури: 1 - паливо 3 (ДСТУ 305-82); 2 - 50% (об.) зрідженого газу + 50% (об.) палив 3; 3

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 36    |

- 75% (об.) зрідженого газу + 25% (об.) палива 3; 4 - 85% (об.) зрідженого газу + 15% (об.) палив 3; 5 - зріджений газ (50% (об.) бутану + 50% (об.) пропану)

Масло і дизельне паливо добре розчиняються в зрідженому газі, утворюючи стійкі суміші з вищою в'язкістю. Це не лише покращує змащувачі властивості палива, але і полегшує його займистість в КЗ дизеля.

Стисливість (коефіцієнт стисливості) пропан-бутанових сумішей при 20°C і тиску в балоні близько 1,5 МПа складає  $\alpha = (350 - 400) \cdot 10^{-1} \text{ Па}^{-1}$  (рис. 2.6, а), що в 5-7 разів перевищує стисливість дизельних палив. Причому із збільшенням температури палива ця різниця помітно зростає.

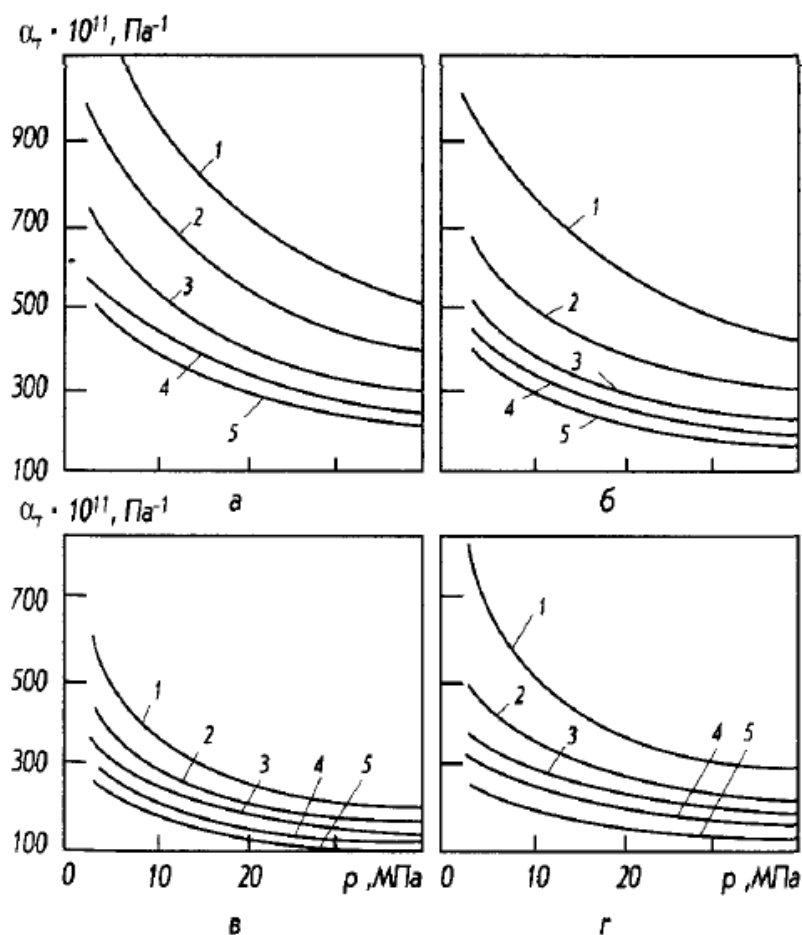


Рис. 2.6 – Залежність коефіцієнта стисливості паливних сумішей від тиску при 90 (Т), 70 (2), 50 (3), 30 (4) і 10°C (5): а – зріджений газ (45,88% (об.) бутану + 54,12% (об.) пропана); б – 80% (об.) зрідженого газу + 20% (об.) палива Л; в – 40% (об.) зрідженого газу + 60% (об.) палив Л; г – 60% (об.) зрідженого газу + 40% (об.) палив Л

Підвищена стисливість зріджених газів, обумовлена їх легенею фракційним складом і підвищеною випаровуваністю вхідних в них вуглеводнів, несприятливо позначається на процесі паливоподачі, приводячи до зменшення ЦПП і повному виключенню подачі, особливо на режимах з неповним навантаженням. Додавання в зріджений газ дизельного палива з метою збільшення його в'язкості і поліпшення займистості сприятливо позначається і на стисливості палива (рис. 2.6, б, в, г). Так, стисливість суміші, що складається з 80% (об.) зрідженого газу і 20% (об.) палив Л, на 25-35% нижче за стисливість чистої пропан-бутанової суміші (див. рис. 2.6, б).

Спільний вплив трьох розглянутих фізичних властивостей зріджених газів і їх підвищена випаровуваність приводять до значного зменшення ЦПП, що досягає 50% при роботі на номінальному режимі.

Уникнути значного зменшення ЦПП при роботі на зріджених газах, що подаються в КЗ дизеля штатним ПНВт, можливо або шляхом коректування ЦПП за допомогою пристроїв, що коректують, або шляхом заміни серійних плунжерних пар парами більшого діаметру.

Зріджені гази володіють високою теплотою випару, що перевищує в 1,5-1,7 разу теплоту випару дизельного палива. Тому подача в КЗ зрідженого газу і його подальший випар приводять до значного охолодження повітряного заряду, що позитивно впливає на екологічні показники дизеля.

Газові палива можуть подаватися в циліндри двигунів з балонів, як із стислим, так і із зрідженим газом. Крім того, фізичні властивості цих палив відрізняються від фізичних властивостей традиційних нафтових палив (дизельних, гасу та ін.). Всі ці чинники приводять до того, що вживані в дизелях системи паливоподачі не можуть забезпечити подачу газоподібного палива в КЗ.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 38    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Отже, необхідні оригінальні системи паливоподачі для газових і газодизельних двигунів, що відрізняються від класичних систем паливоподачі.

### 2.3 Паливні системи газорідинних двигунів

Останніми роками зріс інтерес до використання природного газу в двотактних малооборотних дизелях крейцкопфів. Фірмами MAN B&W та Mitsui запропонована система подачі газу в циліндри двигуна під високим тиском, перевагою якої є те, що газ не стискується на такті стискування. Це усуває вірогідність детонації, що є обмежуючим чинником для підвищення середнього ефективного тиску при подачі газу при низькому тиску.

Конструкція двигуна й паливна система мають ряд змін в порівнянні з двигуном, призначеним для роботи лише на важкому паливі.

Газове паливо стискується в компресорі 1 (рис. 2.7) до тиску приблизно 25 МПа, необхідного для подачі газу в циліндри двигуна в кінці процесу стискування. Потім газ охолоджується, очищається від вологи та поступає в буферний бак (на рис. не показані). З бака газ по трубопроводу 2 поступає в акумулятор 1 (рис. 2.8) і через швидкодіючий клапан відключення подачі газу 3 поступає до форсунок 4. Форсунка спеціально сконструйована для одночасного уприскування запального рідкого палива й основної дози газоподібного палива. Схема, конструкція і система управління газовою для палива форсункою розглянута в наступному розділі. В разі зависання голки форсунки клапан, перекриває подачу газу в циліндр і скидає його в трубопровід 5, що відводить газ за межі машинного відділення. Всі трубопроводи мають подвійні стінки 6, щоб запобігти витoku газу в разі розриву газової труби. Простір між трубами, фланцями і клапанами і т. д. вентильовується з десятиразовим обміном повітря в годину витяжним вентилятором 3 (див. рис. 2.7), а тиск повітря в просторі між

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 39    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

трубами підтримується нижче за тиск в машинному відділенні. Забір повітря 4 вентилятором і вихід повітря або газоповітряної суміші, в разі витоків, здійснюється за межами машинного відділення. В разі несправності в роботі форсунки газ по трубопроводу 5 відводиться в атмосферу.

Для займання газу в циліндр упорскує рідке паливо в кількості 8% при роботі на МДМ.

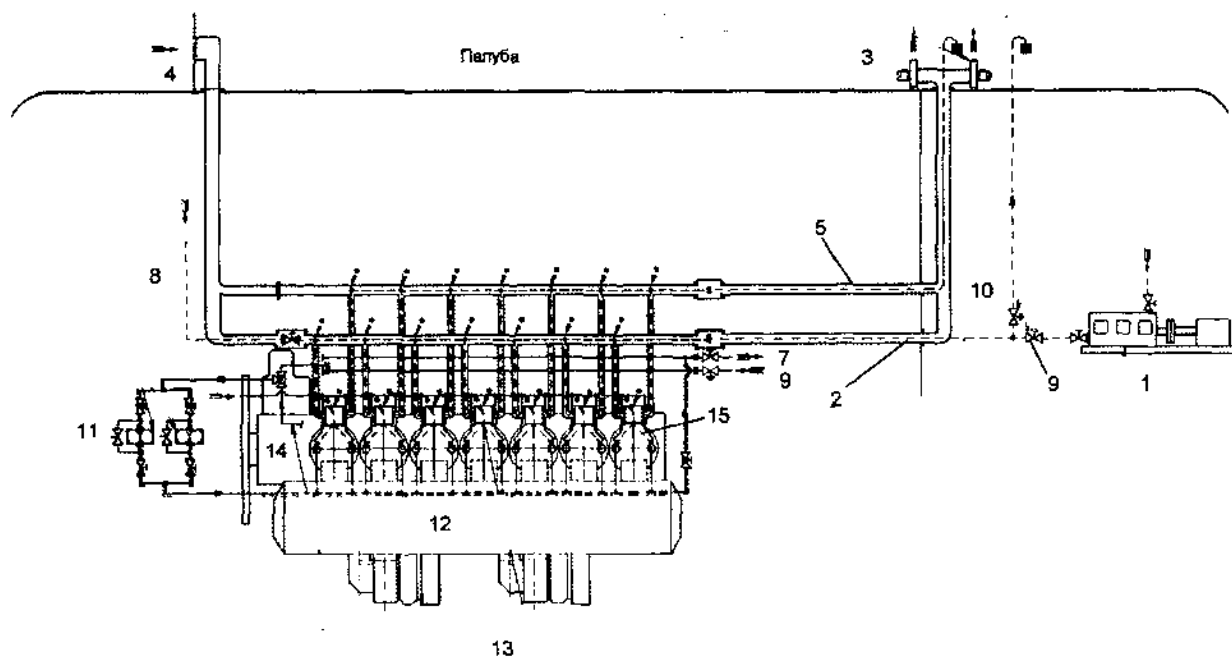


Рис. 2.7 – Система подачі газового палива: 1 - газовий компресор; 2 - трубопровід подачі газу до двигуна; 3 - витяжний вентилятор; 4 - забір повітря; 5 - трубопровід відведення газу; 6 - підведення рідкого палива; 7 - відведення відсічного палива; 8 - вхід інертного (азоту) газу; 9 - нормально відкритий газовий клапан; 10 - нормально закритий клапан інертного газу; 11 - насос масла високого тиску; 12 - колектор випускних газів; 13 - клапан контролю подачі газу в циліндр і розподільна коробка; 14 - підведення ущільнюючого масла до насосів високого тиску; 15 - циліндр двигуна

Дизель може працювати лише на рідкому паливі або при різних співвідношеннях рідкого і газоподібного палива. Всі пуски і зупинки двигуна виробляються лише на рідкому паливі, яке поступає по



трубопроводу 6, а відсічне паливо і безперервно циркулююче через ПНВТ і форсунку відводиться по трубопроводу 7.

При переході з роботи на газі на рідке паливо вся паливна система автоматично продувається інертним газом (азотом), який подається по трубопроводу 8 під тиском 0,25 МПа. При продуванні трубопроводів автоматично перекривається нормально відкритий клапан 9 і відкривається нормально закритий клапан 10.

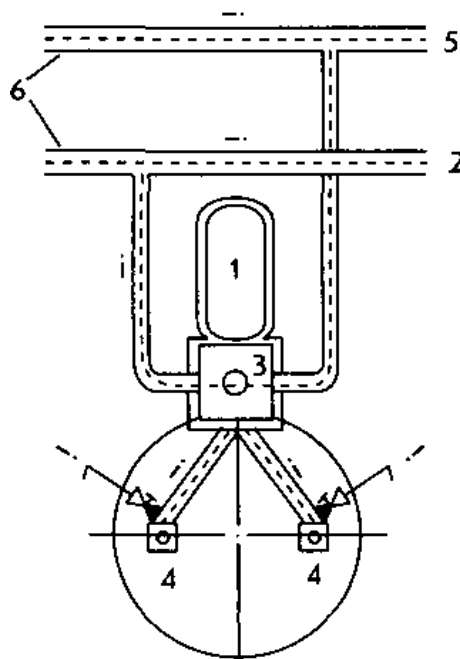


Рисунок 2.8 – Схема подачі газу в один циліндр: 1 - акумулятор газу; 2 - трубопровід підведення газу; 3 - розподільна коробка і клапан відключення подачі газу в циліндри; 4 - газопаливна форсунка, 5 - трубопровід відведення газу; 6 - захисна труба

В разі попадання великих кількостей газу у випускний колектор, наприклад, при пропуску спалахів в циліндрі, або пізнього займання, в колекторі може статися згорання газу, що приведе до різкого підвищення тиску в ньому. Щоб запобігти цьому негативному явищу, встановлюються запобіжні клапани або розривні мембрани, які здійснюють випуск за межі машинного відділення. Крім того, машинне відділення повинне мати

хорошу вентиляцію, а у верхній частині двигуна встановлюють витяжні парасольки з газоаналізатором. Постійний контроль процентного вмісту газу здійснюється також в машинному відділенні, у вентиляційному каналі та з потреби в інших місцях з подачею сигналу при концентрації газу 30% від нижньої вибухової межі.

Для відкриття газової форсунки встановлюється окремий насос подачі масла на управління. Він представляє стандартний насос уприскування палива, плунжер якого виконаний з косими кромками і приводом від розподільного валу. Щоб забезпечити ущільнення між газом, паливом і маслом на управління в об'єднаній форсунці та змащувати рухомі частини, є окрема система масла ущільнювача. Ця система 11 (див. рис. 2.7) має окремий привід і запускається до пуску двигуна. Робочий тиск складає приблизно 30 МПа, необхідна продуктивність для двигуна потужністю 20000 кВт близько 10 л/год. Як рідина ущільнювача можна використовувати паливо або змащувальне масло. В останньому випадку є окреме підведення 14 масел до насосів 11.

Газорідинні двигуни на базі дизелів серії RTA фірми Sulzer призначені для нової серії транспортних суднів-метановозів, що перевозять зріджений природний газ (ЗПГ). Розроблені фірмою Sulzer Brothers Ltd. спільно з японськими ліцензіатами газорідинні двигуни забезпечують номінальну потужність, рівну потужності дизеля серії RTA, без зниження  $\eta_e$  шляхом подачі в циліндр газу під високим тиском і уприскування мінімальної кількості запального рідкого палива при вільному регулюванні співвідношення двох видів палива. Передбачена можливість повного переведення двигуна з газу на рідке паливо.

Основна увага при проектуванні сучасних газорідинних дизелів приділяється питанням безпеки і надійності. Фірма Sulzer керувалася також наступними принципами: 1) максимальне використання уніфікованих деталей; 2) мінімум модифікації серійного дизеля без зниження надійності

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 42    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

при проведенні необхідних модифікацій; 3) підвищення надійності шляхом виключення всіх можливих витоків газу.

Головні газорідинні дизелі призначені для метановоза, що вміщає 125000  $\text{м}^3$  ПГ. Не дивлячись на наявність потужної теплової ізоляції танків із ЗПГ має місце приплив теплоти, що викликає випар частини ЗПГ. Кількість газу, що випарувався, досягає 1% в добу від кількості, що перевозиться. Схема газової паливної системи приведена на рис. 2.9.

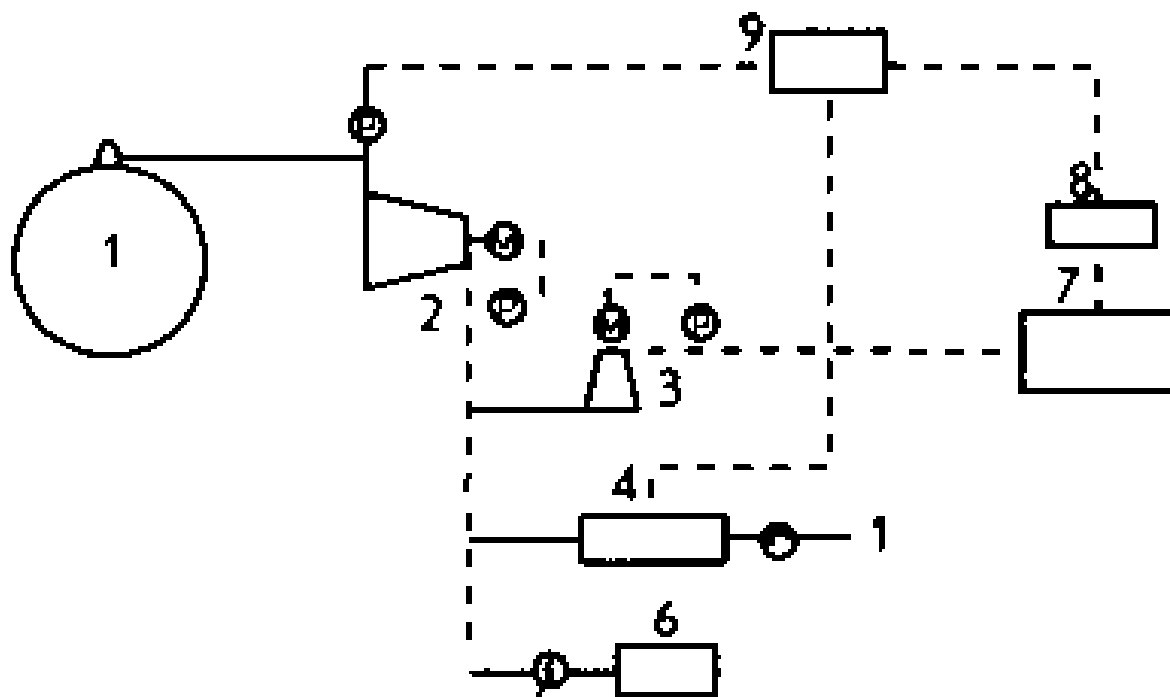


Рис. 2.9 – Схема газової паливної системи: 1 - вантажний танк із ЗПГ; 2 - компресор для стискування газу, що випарувався; 3 - послідовно підключений поршневий компресор, що здійснює стискування ПГ до тиску 20-25 МПа; 4 - установка для зріджування зайвого (не використововуваного дизелем) газу, що зливається у вантажний танк; 5 - підігрівач; 6 - допоміжний парогенератор; 7 - головний газорідинний дизель; 8 - система регулювання дизеля; 9 - блок управління вступом ПГ

Після компресора газ охолоджується до 40-50°C і по газопроводах з подвійними стінками прямує до форсунок кожного циліндра дизеля. На один циліндр передбачено дві газові форсунки та дві для уприскування

Конструктивні заходи безпеки передбачали установку системи газопроводів ВД з подвійними стінками для подачі газу від компресора до газорідинного дизеля, потім газ поступає у форсунки. На рис. 2.10 показана схема системи забезпечення безпечної експлуатації.

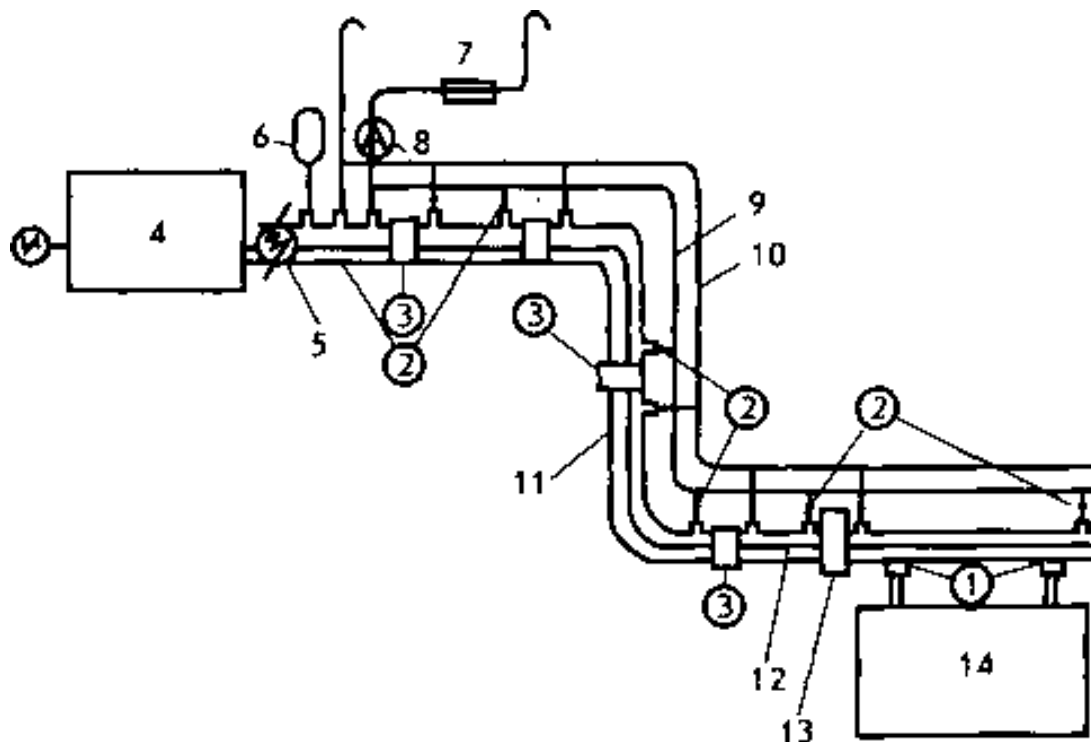


Рис. 2.10 – Схема системи забезпечення безпечної експлуатації:

1 - швидкодіючі відсічні клапани кожного циліндра; 2 - газові датчики; 3 - секційні запобіжні клапани; 4 - газовий компресор ВД; 5 - теплообмінник охолодження газу; 6 - буферний об'єм; 7 - полум'ягасник; 8 - відсмоктуючий насос; 9 - вентиляційний повітропровід; 10 - впускний трубопровід; 11 - зовнішня труба; 12 - газопровід ВД; 13 - головний газовий клапан; 14 - газорідинний дизель серії RTA

У кільцевому просторі, утвореному двухстіночним трубопроводом, циркулює повітря, що поступає з вентиляційного повітропроводу з тиском

нижче атмосферного. Потім повітря поступає в газовий детектор для контролю наявності  $\text{CH}_4$ , після чого через запобіжну вентиляційну систему викидається в атмосферу.

У даній системі передбачається очищення газопроводу ВД інертним газом. Газопровід ВД по всій лінії від газового компресора до дизеля поділений на декілька секцій, кожна завдовжки близько 15 м, між якими встановлені запобіжні клапани, що автоматично діють в обох напрямках, негайно припиняють подачу газу, як тільки його витрату перевищить деякий рівень. Діаметр і товщина стінки зовнішньої запобіжної труби вибрані такими, що вся кількість газу при прориві, що знаходиться в одній секції, може заповнити кільцевий простір при помірному тиску. Секційні запобіжні клапани подвійної дії. Диск клапана поміщений між двома пружинами, характеристики яких вибрані так, що клапан залишається відкритим, коли потік газу не перевищує заданого. Як тільки витрата газу стане більша допустимого, клапан закривається. Кожен клапан може бути встановлений або демонтований без порушення секції газопроводу ВД або запобіжної зовнішньої труби.

На вході в розподільний газопровід встановлений головний клапан, що перекриває подачу газу в двигун. Крім того, в патрубках подачі газу в окремі циліндри поміщені швидкодіючі відсічні клапани, які одночасно забезпечують відведення газу, що залишився в патрубках, через вентиляційний повітропровід в атмосферу.

Головним елементом системи регулювання двофазного двигуна є врівноважуючий важіль, який розподіляє циклову подачу палива між природним газом і дизельним паливом. Звичайний регулювальник швидкості пов'язаний з віссю гойдання цього важеля, а кінці його - з ПНВТ і рейкою насоса, регулюючого подачу газу. Крім того, є пневматичний сервомотор, зв'язаний через пружинну муфту з регулюючим насосом подачі газу. Управління сервомотором здійснюється через електронний блок, який

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 45    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

отримує сигнали від індикатора навантаження двигуна і двох встановлюваних уручну важелів (один - для вибору необхідного режиму роботи, другої, - для вибору співвідношення, природний газ - дизельне паливо).

Чотири отвори під форсунки залишаються незмінними, лише в два з них ставлять заглушки при роботі на двох паливах. Додатково свердлять два отвори під газові форсунки, кожне під кутом 90° до повітряного пускового клапана.

Голка газової форсунки ущільнюється в корпусі дизельним маслом для того, щоб газ не попав в систему регулювання. Друге масляне ущільнення застосовується в сполученні форсунка-стакан. Нижня частина газової форсунки охолоджується водою. Підйом голки форсунки реєструється датчиком, тому несправна форсунка легко визначається.

Для регулювання подачі газу використовується стандартний паливний насос високого тиску від дизеля ZA40. Плунжер і гільза злегка модернізуються.

Перевагами двохпаливних двигунів з подачею газу під високим тиском в циліндри є високий ефективний ККД, який рівний ККД дизеля, збільшені терміни служби масла і вихлопних клапанів.

Безпека роботи - головна вимога до будь-якого двигуна, що працює на газі, тому фірмою були розроблені додаткові пристрої для зниження часу визначення місця виниклої несправності і зменшення можливості витоку газу.

## **2.4 Проблеми переводу суднових двигунів на газове паливо та заходи по забезпеченню безпеки**

Доцільність використання природного газу як моторне паливо в районах, пов'язаних з видобутком і транспортуванням газу, ніколи не

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 46    |

бралася під сумнів. Сучасний етап розвитку економіки лише вніс ряд коректив до цієї проблеми. Що ж до дизелів, складових енергетичну основу водного транспорту, то їх переклад на газ гальмується рядом чинників [7].

Виникаючі проблеми можна розділити на три, тісно зв'язані групи. Перша - питання зберігання газу. В даний час зберігання природного газу на судні найпростіше здійснюється в стислому вигляді. Балони з армованого пластика забезпечують порівняно хороші показники за питомим обсягом і масою системи зберігання. Проте для двигунів високої потужності, що мають значну тривалість автономного плавання, перспективним є криогенний спосіб зберігання. Перший варіант вже успішно проходить дослідну експлуатацію на судах СЗРП, по другому розроблена технічна документація для судів типу «Метеор».

Друга, надзвичайно важлива для суднових установок проблема - безпека експлуатації. В цьому відношенні накопичений чималий світовий і вітчизняний досвід, що показує, що токсична небезпека при використанні природного газу мінімальна, а пожаро- і вибухобезпечність можуть бути зведені до мінімуму за допомогою ряду конструктивних і організаційних заходів.

Нарешті, третя група питань пов'язана безпосередньо з роботою моторної установки. До них відносяться організація робочого процесу, паливоподачі і регулювання.

При переведенні на газове паливо дизельного двигуна найбільш очевидним варіантом організації робочого процесу є газодизельний. При цьому можна зберегти незмінними основні параметри й регулювання базового двигуна, обмежившись створенням системи подачі газу в двигун і зміною системи регулювання потужності. За таким принципом здійснений, зокрема, переклад на газ двигунів ЗДб теплохода «Нева-1», що знаходиться в дослідній експлуатації. При цьому навіть така нескладна схема забезпечує зниження витрат на паливо майже удвічі при значному поліпшенні

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 47    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

показників димності та токсичності відпрацьованих газів (зниження димності в 5-10 разів,  $\text{NO}_x$  - на 20%). Проте ці показники значно поступаються тим, які досягаються в досконаліших газодизельних системах. В основі цього - значно вища, ніж це мінімально необхідно, величина запальної порції дизельного палива.

Згідно з літературними даними, сучасні газодизельні двигуни стійко працюють при дозі палива, відповідною 6-8% від номінального підведення теплоти. Спеціальні заходи (форкамерне займання) дозволяють понизити цю дозу до 3-5%. У останньому випадку потрібна, проте, істотна переробка двигуна. У згаданих вище дослідних двигунах ця величина складає 15-20%, причому на малих навантаженнях подача дизельного палива повинна підвищуватися.

Розтягнуте згорання основного (газового) палива приводить до погіршення показників економічності та токсичності. Зменшити тривалість поширення полум'я в газодизелі можна, зменшивши довжину пробігу фронту полум'я за рахунок перенесення джерела займання від центру камери згорання до її периферії, для чого необхідно збільшити далекобійність паливного струменя. Проте паливна апаратура дизелів, зазвичай використовується для подачі запальної порції, налаштовується на номінальний режим з таким розрахунком, щоб далекобійність паливного струменя відповідала розміру камери згорання. Із зменшенням подачі тиск уприскування, а в той же час і далекобійність струменя, падає. Одночасно спостерігаються такі явища, як нестабільність подачі від циклу до циклу і нерівномірність її розподілу по циліндрах.

Таким чином, першочерговим завданням при організації газодизельного процесу є забезпечення ефективного уприскування при малих подачах.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 48    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |



При вживанні газоподібного палива в суднових дизелях повинні виконуватися спеціальні вимоги до конструкції двигуна і паливних систем, що забезпечують тривалу безпечну експлуатацію.

Природний газ і, зокрема, його основний компонент ( $\text{CH}_4$ ) є досить безпечним. Природний газ за нормальних умов практично в два рази легше за повітря, тому при витоках він швидко спрямовується вгору та розсівається в повітряному середовищі. Та і швидкість поширення полум'я в суміші, що містить 10% метану, складає всього 35 см/с, що менше, ніж в інших видів палива, і ця швидкість зменшується з наближенням до верхнього або нижнього концентраційним межам займання (ВКПВ і НКПВ відповідно), а температура займання збільшується.

Досить високий поріг НКПВ, необхідний для утворення горючої суміші, полегшує виявлення витоків за допомогою приладів-сигналізаторів і представляє обслуговуючому персоналу деякий час для виявлення та ліквідації небезпечної ситуації. Боротьба з вогнищем займання метану в замкнутому об'ємі також не викликає великих труднощів, оскільки додавання в метаноповітряну суміш 25% вуглекислого газу або 40% азоту роблять її взагалі нездібною горіти. Будь-які негорючі газоподібні, рідкі і тверді розчинники знижують температуру полум'я, швидкість його поширення і швидкість протікання хімічної реакції окислення палива. Тому для гасіння природного газу рекомендується застосовувати інертні гази, дрібнорозпилену воду та пісок. Високоєфективні також полум'ягасники з пористих матеріалів (кульки, сітки, рифлена стрічка й тому подібне), які знижують температуру фронту полум'я нижче за температуру займання.

Усередині трубопроводів і газової арматури, що працюють під тиском, у зв'язку з досить вузькими концентраційними межами займання метаноповітряних сумішей, утворення пожежовибухонебезпечних сумішей практично виключено. Проте при заповненні системи газом можливе короткочасне існування сумішей у вибухонебезпечних концентраціях.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 49    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Небезпека посилюється наявністю плівки змащувальних масел. Тому в цілях безпеки первинне заповнення систем газом слід виробляти після продування системи інертним газом, наприклад, азотом.

У зв'язку з тим, що в паливній системі газового двигуна два види палива: рідке і газоподібне, для безпечної і безаварійної роботи газодизеля необхідно зберегти всі види захисту дизеля і доповнити специфічними захистами:

1. Відключення подачі газу при падінні тиску рідкого палива в трубопроводі низького тиску для виключення пропуску спалахів в циліндрах через відсутність запального палива.

2. По тиску газоподібного палива, що забезпечує відключення його при недопустимих відхиленнях тиску.

3. На кришках люків картера мають бути встановлені запобіжні клапани з сітками.

4. Пуск, зупинка і робота при навантаженні менше 15%  $P_{e\text{ном}}$  виконується лише на рідкому паливі.

5. У машинному відділенні необхідна система контролю наявності метану в зонах можливих витоків і скупчення газу з попереджувальною сигналізацією при концентрації 20% НКПВ та аварійною (виконавчою) сигналізацією при 50-70% НКПВ.

6. Газові трубопроводи двигуна і система випуску відпрацьованих газів повинні мати можливість продування інертним газом або повітрям.

7. Відсічні клапани на вході газу в машинне відділення мають бути дубльовані.

8. З метою виключення попадання газу в машинне відділення при можливих витоках в зоні розташування газових трубопроводів газодизеля рекомендується установка кожуха з організацією відсмоктування повітря або організація інтенсивної вентиляції з відсіченням подачі газу при її відключенні.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 50    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Вищеперелічені заходи відповідають основним вимогам для тривалої безаварійної роботи суднових газових дизелів, своєчасного виявлення витоків газу і усунення небезпечних наслідків від них.

## **2.5 Використання VOC газу в якості основного палива на нафтових танкерах**

Для обслуговування автономних морських нафтових родовищ, від яких неможлива прокладка трубопроводів до берега, широко використовуються човникові танкери. В період обробки нафти при вантаженні, коли сира нафта ллється в суднові вантажні танки, заповнені інертним газом, велика кількість легких компонентів сирової нафти випаровується. Ці пари нафти зазвичай називаються леткими органічними компонентами (VOC).

До складу VOC входять метан, етан, пропан, бутан, пентан і деякі вищі вуглеводні.

Дослідження компанії Stotoil емісії VOC на човникових танкерах показали, що значна кількість нафтової пари вивільняються в атмосферу не лише при вантаженні, але й під час плавання. Величина енергії, що втрачається при вивільненні VOC в атмосферу, порівнянна із загальною витратою важкого палива судном за рейс, що привело до ідеї використовувати VOC як основного палива для двигунів. Це понизило б дію VOC на довкілля, забезпечило б значну економію витрат на важке паливо і понизило б емісію випускного газу від двигуна.

Система паливоподачі для роботи двигуна на VOC може бути дуже схожа на системи двигунів, що працюють на природному газі з уприскуванням під високим тиском.

Принципова схема збору, зберігання і підготовки VOC до спалювання в двигуні приведена на рис. 2.11. Велика частина VOC випаровується при

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 51    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

вантаженні 1, коли сира нафта ллється в суднові вантажні танки 5, заповнені інертним газом 7. Розбризкування, як і присутність інертного газу, сприяє випару легких фракцій, особливо метану, етану, пропану, бутану, пентану і деяких вищих вуглеводнів. Зазвичай пропан і важчі вуглеводні VOC конденсуються в блоці 3 і знаходяться в рідкому стані, тоді як метан і етан виходять в атмосферу разом з інертним газом 4.

Газ VOC містить, таким чином, вищезгадані вуглеводні, а також інертний газ. При вантаженні пропорція вмісту інертного газу змінюється приблизно від 80% об'єму викиду на початку вантаження до приблизно 30%, коли танки майже повні. Склад вуглеводневої частини VOC змінюється під час вантаження, залежить від нафтових родовищ і терміну їх експлуатації.

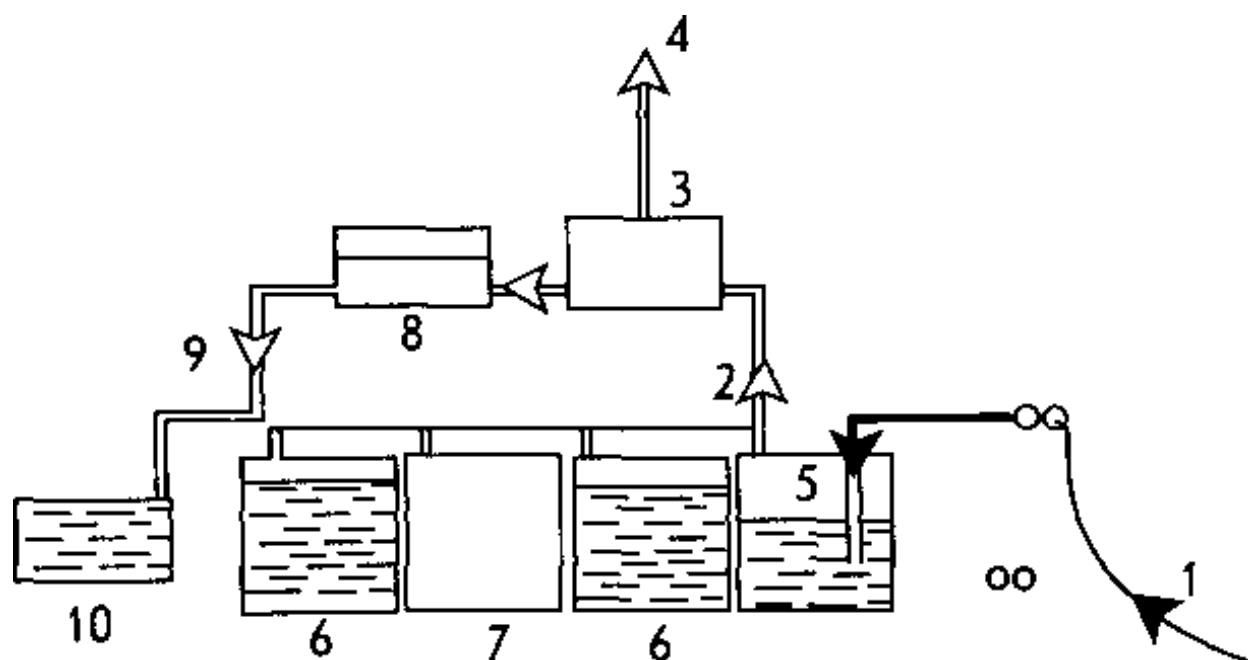


Рис. 2.11 – Принципова схема паливopідготовки VOC до спалювання:  
 1 - пристрій вантаження нафти в танки; 2 - суміш VOC і інертного газу; 3 - конденсатор VOC; 4 - вихід в атмосферу метану і інертного газу; 5 - завантажуваний танк; 6 - повний танк; 7 - танк з інертним газом і вуглеводнем; 8 - цистерна з рідким VOC; 9 - подача VOC до двигуна; 10 – двигун

На першому етапі система збирає і зберігає неметанову частину VOC, тобто головним чином пропан, бутан і вищі вуглеводні, які знаходяться в рідкому стані, тоді як метан і етан безповоротно втрачаються. В майбутньому можливе використання і цих складових VOC як паливо для двигуна.

Зріджений VOC зберігається в ізольованій цистерні при низькій температурі й атмосферному тиску. Він подається до двигуна під високим тиском насосом мембранного типу. Заздалегідь підігріті VOC упорскують безпосередньо в камеру згорання відразу після уприскування рідкого палива (в кількості 8% від витрати палива при 100%-вому навантаженню), яке діє як запальне паливо і забезпечує стабільне і надійне займання в циліндрі на всіх навантаженнях двигуна. Якщо немає достатньої кількості VOC, то збільшують подачу рідкого палива, щоб забезпечити необхідну потужність двигуна. Тому важливою вимогою двоохпальної системи є здатність двигуна працювати при будь-якому співвідношенні між рідким паливом і газом.

В даній магістерській роботі буде розглянута можливість та ефективність використання VOC газу для роботи головного двигуна 6L35MC нафтового танкера проекту 17120.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 53    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

### **РОЗДІЛ 3. МОДЕРНІЗАЦІЯ ГОЛОВНОГО ДВИГУНА MAN B&W 6L35MC ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ ВИПАРНОГО ГАЗУ**

В даному розділі проведені розрахунки робочого циклу двигуна 6L35MC на важкому паливі та на суміші важкого палива і випарного газу. Також розглянуті питання модернізації паливної системи двигуна та проектування двохпаливної форсунки.

#### **3.1 Тепловий розрахунок головного двигуна при роботі на важкому паливі**

Розрахунковий цикл поршневого двигуна внутрішнього згоряння значно відрізняється від ідеальних циклів. В розрахунковому циклі двигуна внутрішнього згоряння змінюється кількість робочого тіла, його состав і фізичні властивості. Внаслідок кінцевої швидкості згоряння та дисоціації продуктів згоряння прихована в паливі хімічна енергія виділяється не миттєво. В процесі розширення проходять догоряння палива та відновлення дисоційованих газів, з виділенням тепла. В розрахунковому циклі робоче тіло не можна приймати з постійними теплоємностями, так як температура та состав газів в циліндрі значно змінюються. В розрахунковому циклі також маються теплові та аеродинамічні втрати [2].

Крім розрахункового треба розглядати ще дійсний цикл, котрий здійснюється в працюючому двигуні і в наступний час не може бути точно описаним із за недосконалості розрахункових методик та складності процесів, що протікають в ньому. Чим більш досконала методика теплового розрахунку, тим більш ближче розрахунковий цикл до дійсного [10].

В даній магістерській роботі використовується класична методика теплового розрахунку, розроблена В. І. Гріневецьким і далі вдосконаленого Є. К. Мазінгом.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 54    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Метод теплового розрахунку заснований на загально відомих положеннях термодинаміки та термохімії, достатньо повно охоплює сутність теплових явищ, що протікають в робочому циліндрі і представляє собою інженерне аналітичне дослідження.

На його основі можливо:

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

Метод забезпечує достатню задовільну для практики точність розрахунків, не дивлячись на те, що цикл, що проходить в двигуні описується найпростішими термодинамічними процесами і вводиться ряд опитних коефіцієнтів, які оцінюють реальні умови протікання робочих процесів в двигуні.

### **Вибір й обґрунтування вихідних даних для теплового розрахунку**

*Температура навколишнього повітря  $T_0$ .* Приймаємо  $T_0 = 293$  К (стандартні умови застосування).

*Тиск навколишнього повітря  $p_0$ .* Варто приймати  $p_0 = 0,1013$  МПа (стандартні умови застосування).

*Ступінь стиску  $\epsilon$ .* При призначенні ступеня стиску варто враховувати розміри циліндра і спосіб сумішоутворення. Приймаємо  $\epsilon = 13,5$ .

*Коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ .* Цей коефіцієнт також залежить від розмірів циліндра і способу сумішоутворення. Цей параметр при підвищенні зменшує питому витрату пального, водночас зменшуючи середній ефективний тиск та потужність.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 55    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Відповідно його слід підбирати з кількох спроб розрахунку з урахуванням одночасного досягнення заданої потужності і найкращої можливої економічності. Вибір остаточного значення  $\alpha$  робиться з вибором оптимального значення  $P_k$ . З урахуванням переліченого встановлюємо  $\alpha = 2,72$ .

*Показник адіабати повітря  $k_a = 1,4$ .*

*Механічний ККД турбіни  $\eta_{t.m} = 0,96$ .*

*Адіабатний ККД турбіни  $\eta_{t.ad} = 0,781$ .*

*Коефіцієнт залишкових газів  $\gamma_r$ .* Вплив на значення цього коефіцієнту завдають тип двигуна, особливості повітропостачання і газообміну. Приймаємо  $\gamma_r = 0,05$ .

*Коефіцієнт використання теплоти в точці  $z$  ( $\xi_z$ ), та в точці  $b$  ( $\xi_b$ ).* Ця величина змінюється в широких межах і залежить від ступеня досконалості двигуна. Найкраще ці величини призначати після аналізу теплового балансу двигунів, близьких до проектного.

Приймаємо  $\xi_z = 0,95$ ;  $\xi_b = 0,98$ .

*Ступінь підвищення тиску при згорянні  $\lambda$ .* Приймаємо  $\lambda = 1,16$ .

*Підігрів заряду від стінок циліндру  $\Delta T_a$ .* Ця величина складає: (5 – 45) К – для ДВЗ з наддувом та (10 – 20) К – для ДВЗ без наддуву.

Приймаємо  $\Delta T_a = 10$  К.

*Коефіцієнт скруглення індикаторної діаграми  $\zeta$ .* Величину цього коефіцієнту вибирають на підставі дослідних даних, звертають увагу на тип двигуна та особливості системи газообміну.

Приймаємо  $\zeta = 0,98$ .

*Механічний ККД двигуна  $\eta_m$ .*

Приймаємо  $\eta_m = 0,95$ .

*Зменшення тиску у повітроохолоджувачі  $\Delta P_{ox}$ .* Повітроохолоджувач являє собою опір на шляху повітря, тому у ньому відбувається зменшення тиску повітря. У числовому виразі  $\Delta P_{ox} = 0,004$  МПа.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 56    |



*Температура залишкових газів  $T_r$ .*

Приймаємо  $T_r = 700$  К.

*Хімічний склад палива.* Розрахунок проводиться на важке 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 [6].

*Коефіцієнт тактності  $Z$*  – являє собою кількість робочих ходів поршня, що припадають на один оберт колінчастого вала, тоді для 2-тактних двигунів  $Z = 1$ .

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

*Ступінь підвищення тиску в компресорі  $\Pi_k$ .* Для даного типу компресора приймаємо  $\Pi_k = 3,6$ .

*Частка ходу поршня втраченого на продувку  $\varphi_n$ .* Для 2-тактних двигунів  $\varphi_n = 0,045$ .

### **Результати теплового розрахунку двигуна на важкому паливі**

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

Точність розрахунку вважалася задовільною, якщо різниця між заданої і отриманої 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  $\alpha$  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  $\Pi_k$  (отриманим в результаті розрахунку циклу) не перевищувала

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 57    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

0,5%. В якості прикладу, представимо повний розрахунок номінального режиму роботи двигуна.

#### Розрахунок процесу наповнення

Температура повітря за компресором, К

$$T_k = T_0 \times \left[ 1 + \frac{\left( \frac{P_k}{P_0} \right)^{0,286} - 1}{\eta_{k.ad}} \right] = 293 \times \left[ 1 + \frac{\left( \frac{0,36}{0,101} \right)^{0,286} - 1}{0,77} \right] = 459,339$$

Температура повітря перед двигуном, К

$$T_s = T_k - \eta_o \times (T_k - T_0) = 459,339 - 0,8 \times (459,339 - 293) = 310,274$$

Температура заряду наприкінці процесу наповнення, К

$$T_a = \frac{T_s + \Delta T_a + \gamma_r \times T_r}{1 + \gamma_r} = \frac{310,274 + 10 + 0,05 \times 700}{1 + 0,05} = 338,356$$

Тиск повітря перед двигуном, МПа

$$P_s = P_k - \Delta P_{ox} = 0,36 - 0,004 = 0,356$$

Тиск заряду наприкінці процесу наповнення, МПа

$$P_a = 0,97 \times P_s = 0,97 \times 0,356 = 0,345$$

Коефіцієнт наповнення

$$\eta_n = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} \times \frac{P_a}{P_s} \times \frac{T_s}{T_a} \times \frac{1}{1 + \gamma_r} \times (1 - \varphi_n) = \frac{13,5}{13,5 - 1} \times \frac{0,345}{0,356} \times \frac{310,274}{338,356} \times \frac{1}{1 + 0,05} \times (1 - 0,045) = 0,874$$

#### 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

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 58    |

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  $n_l$  величина якого забезпечує одержання такої ж роботи в процесі стиску, як і при змінному показнику у дійсному процесі.

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

$$n_l = 1,364$$

Тиск в кінці процесу стиску, МПа

$$P_c = P_a \times \varepsilon^{n_l} = 0,345 \times 13,5^{1,364} = 12,024$$

Температура в кінці процесу стиску, К

$$T_c = T_a \times \varepsilon^{n_l - 1} = 338,356 \times 13,5^{1,364 - 1} = 872,712$$

#### Розрахунок процесу згоряння

Дійсна кількість повітря для згоряння, кмоль/кг

$$L = \frac{\alpha}{0,21} \times \left( \frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{S}{32} - \frac{O}{32} \right) = \frac{2,72}{0,21} \times \left( \frac{0,87}{12} + \frac{0,126}{4} + \frac{0}{32} - \frac{0,004}{32} \right) = 1,345$$

Хімічний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta_0 = 1 + \frac{8 \times H + O}{32 \times L} = 1 + \frac{8 \times 0,126 + 0,004}{32 \times 1,345} = 1,0235$$

Дійсний коефіцієнт молекулярної зміни

$$\beta = \frac{\beta_0 + \gamma_r}{1 + \gamma_r} = \frac{1,0235 + 0,05}{1 + 0,05} = 1,0224$$

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 59    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Доля палива, що згоріла в точці z

$$x_z = \frac{\xi_z}{\xi_b} = \frac{0,95}{0,98} = 0,969$$

Коефіцієнт молекулярної зміни в точці z

$$\beta_z = 1 + \left( \frac{\beta_0 - 1}{1 + \gamma_r} \right) \times x_z = 1 + \left( \frac{1,0235 - 1}{1 + 0,05} \right) \times 0,969 = 1,022$$

Максимальна температура згоряння, К

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

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

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

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

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

Це рівняння розв'язується методом послідовних наближень, для чого у першому наближенні приймаємо  $T_z = 1600$  К. Після вирішення декількох рівнянь отримуємо:

$$T_z = 1665$$

Максимальний тиск згоряння, МПа

$$P_z = \lambda \times P_c = 1,16 \times 12,024 = 13,948$$

#### Розрахунок процесу розширення

Ступінь попереднього розширення

$$\rho = \frac{\beta_z}{\lambda} \times \frac{T_z}{T_c} = \frac{1,022}{1,16} \times \frac{1665}{872,712} = 1,681$$

Ступінь подальшого розширення

$$\delta = \frac{\varepsilon}{\rho} = \frac{13,5}{1,681} = 8,033$$

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

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 60    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

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 приймемо:

$$n_2 = 1,294$$

Температура в кінці процесу розширення, К

$$T_b = T_z \times \frac{1}{\delta^{n_2-1}} = 1665 \times \frac{1}{8,033^{1,294-1}} = 903,226$$

Тиск в кінці процесу розширення, МПа

$$P_b = \frac{P_z}{\delta^{n_2}} = \frac{13,948}{8,033^{1,294}} = 0,942$$

#### Визначення індикаторних показників

Теоретичний середній індикаторний тиск, МПа

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

$$= \frac{12,024}{13,5 - 1} \times \left[ 1,16 \times (1,681 - 1) + \frac{1,16 \times 1,681}{1,294 - 1} \times \left( 1 - \frac{1}{8,033^{1,294-1}} \right) - \frac{1}{1,364 - 1} \times \left( 1 - \frac{1}{13,5^{1,364-1}} \right) \right] = 2,064$$

Дійсний середній індикаторний тиск, МПа

$$P_i = P'_i \times \zeta \times (1 - \varphi_n) = 2,064 \times 0,98 \times (1 - 0,045) = 1,932$$

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

$$g_i = 433 \times \frac{P_s \times \eta_n}{\alpha \times L_0 \times T_s \times P_i} = 433 \times \frac{0,356 \times 0,874}{2,72 \times 0,495 \times 310,274 \times 1,932} = 0,167$$

Індикаторний ККД

$$\eta_i = \frac{3600}{g_i \times Q_n} = \frac{3600}{0,167 \times 42700} = 0,505$$

#### Визначення ефективних показників

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 61    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Середній ефективний тиск, МПа

$$P_e = P_i \times \eta_m = 1,932 \times 0,95 = 1,835$$

Ефективний ККД двигуна

$$\eta_e = \eta_i \times \eta_m = 0,505 \times 0,95 = 0,48$$

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

$$g_e = \frac{g_i}{\eta_m} = \frac{0,167}{0,95} = 0,1757$$

Ефективна потужність двигуна, кВт

$$N_e = 13,1 \times D_c^2 \times S_c \times z \times P_e \times n \times i = 13,1 \times 0,35^2 \times 1,05 \times 1 \times 1,835 \times 210 \times 6 = 3896,543$$

Порівняння заданої та отриманої потужності двигуна

$$\Delta N = \frac{N_e - N'_e}{N_e} \times 100\% = \frac{3896,543 - 3900}{3896,543} \times 100\% = -0,089\%$$

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  $R = 287 \text{ *K}$

$$G = \left( \frac{\pi \times D_c^2}{4} \right) \times S_c \times \left( \frac{P_s \times 10^6}{R \times T_s} \right) \times \eta_i \times i \times z \times \left( \frac{n}{60} \right) \times \phi_a =$$
$$= \left( \frac{3,14 \times 0,35^2}{4} \right) \times 1,05 \times \left( \frac{0,356 \times 10^6}{287 \times 310,274} \right) \times 0,874 \times 6 \times 1 \times \left( \frac{210}{60} \right) \times 1,1 = 8,151$$

Витрата газів через турбіну, кг/с

$$G_t = G + g_e \times \frac{N_e}{3600} = 8,151 + 0,1757 \times \frac{3896,543}{3600} = 8,342$$

Тиск газу перед турбіною, МПа

$$P_r = \psi_t \times P_k = 0,95 \times 0,36 = 0,342$$

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 62    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

Температура газу перед турбіною, К

$$T_t = T_b \times \left( \frac{P_r}{P_b} \right)^{\frac{n_2-1}{n_2}} = 903,226 \times \left( \frac{0,342}{0,942} \right)^{\frac{1,294-1}{1,294}} = 717,705$$

Загальна кількість продуктів згоряння, кмоль

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

$$= \left( \frac{0,87}{12} \right) + \left( \frac{0,126}{2} \right) + [0,21 \times (2,72 - 1) \times 0,495] + (0,79 \times 2,36 \times 0,495) = 1,378$$

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

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

$$= \frac{1}{\frac{0,87}{12 \times 1,378 \times 189} + \frac{0,126}{2 \times 1,378 \times 461,6} + \frac{0,21 \times (2,72 - 1) \times 0,495}{1,378 \times 259,8} + \frac{0,79 \times 2,36 \times 0,495}{1,378 \times 296,8}} = 287,551$$

Показник адіабати розширення газу в турбіні

$$k_t = \frac{(a_{vb} + b_b \times T_t) + 8,314}{a_{vb} + b_b \times T_t} = \frac{(19,791 + 0,003 \times 717,705) + 8,314}{19,791 + 0,003 \times 717,705} = 1,381$$

Дійсна ступінь підвищення тиску в компресорі

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

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 63    |

$$= \left[ 1 + \frac{\left( \frac{1,381}{1,381-1} \right) \times 287,551 \times 717,705 \times \left[ 1 - \frac{1}{\left( \frac{0,342}{0,101} \right)^{\frac{1,381-1}{1,381}}} \right] \times 0,96 \times 0,781 \times 8,342}{8,151 \times 287 \times 293 \times \left( \frac{1,4}{1,4-1} \right) \times \frac{1}{0,77}} \right]^{\frac{1}{0,286}} = 3,555$$

Дійсний тиск надуву, МПа

$$P_{kd} = P_k \times P_0 = 3,555 \times 0,101 = 0,3602$$

Порівняння заданого та отриманого тиску надуву

$$\Delta P_k = \frac{P_{kd} - P_k}{P_{kd}} \times 100\% = \frac{0,3602 - 0,36}{0,3602} = 0,044\%$$

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

### 3.2 Тепловий розрахунок головного двигуна на VOC газі

Для розрахунку робочого процесу двигуна на VOC газі приймаємо за основу ті ж допущення і вихідні дані що і для попередніх розрахунків в розділі 3.1.2. Розрахунок проводиться для двигуна, який працює за газорідним циклом. В якості запального палива використовують важке паливо, кількість якого складає 8% від повної витрати палива. 92% складає VOC газ, у склад якого входять: пропан  $C_3H_8$  (40% об.), бутан  $C_4H_{10}$  (40% об.) та пентан  $C_5H_{12}$  (20%). Нижча теплота згоряння газу складає 113565 кДж/м<sup>3</sup>.

Баланс ефективної потужності двигуна і баланс між турбіною і компресором забезпечувався шляхом зміни значення коефіцієнта надлишку

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 64    |



повітря, тобто якісним регулюванням. Результати розрахунків наводяться в таблиці 3.1.

*Таблиця 3.1 – Результати теплового розрахунку двигуна на важкому паливі з домішкою генераторного газу*

| Параметр                                                                    | Значення |
|-----------------------------------------------------------------------------|----------|
| Температура повітря за компресором, $T_k$ (К)                               | 511,0    |
| Температура повітря перед двигуном, $T_s$ (К)                               | 311,0    |
| Температура заряду к кінцю наповнення, $T_a$ (К)                            | 339,0    |
| Тиск повітря перед двигуном, $P_s$ (МПа)                                    | 0,356    |
| Тиск заряду к кінцю наповнення, $P_a$ (МПа)                                 | 0,349    |
| Коефіцієнт наповнення, $\eta_n$                                             | 0,883    |
| Середній показник політропи стиску, $n_1$                                   | 1,371    |
| Тиск в кінці процесу стиску, $P_c$ (МПа)                                    | 12,369   |
| Температура в кінці процесу стиску, $T_c$ (К)                               | 890,4    |
| Ступінь підвищення тиску при згорянні, $\lambda_a$                          | 1,16     |
| Максимальна температура згоряння, $T_z$ (К)                                 | 1924     |
| Максимальний тиск згоряння, $P_z$ (МПа)                                     | 14,349   |
| Ступінь попереднього розширення, $\rho_o$                                   | 1,636    |
| Ступінь наступного розширення, $\delta$                                     | 8,253    |
| Середній показник політропи розширення, $n_2$                               | 1,2817   |
| Температура в кінці процесу розширення, $T_b$ (К)                           | 1060     |
| Тиск в кінці процесу розширення, $P_b$ (МПа)                                | 0,9594   |
| Теоретичний середній індикаторний тиск, $P_{ti}$ (МПа)                      | 2,065    |
| Дійсний середній індикаторний тиск, $P_i$ (МПа)                             | 1,933    |
| Індикаторна питома витрата рідкого палива, $g_i$ (кг/кВт×год)               | 0,0137   |
| Індикаторна питома витрата газового палива, $g_i$ (м <sup>3</sup> /кВт×год) | 0,06     |
| Індикаторний ККД, $\eta_i$                                                  | 0,4929   |
| Середній ефективний тиск, $P_e$ (МПа)                                       | 1,8364   |
| Ефективна витрата газового палива, $g_e$ (м <sup>3</sup> /кВт×год)          | 0,06     |
| Ефективна витрата важкого палива, $g_e$ (кг/кВт×год)                        | 0,0144   |
| Ефективний ККД, $\eta_e$                                                    | 0,468    |
| Ефективна потужність, $N_e$ (кВт)                                           | 3898     |

### 3.3 Розробка системи подачі та впорскування VOC газу

Пропонується застосування системи подачі газу під високим тиском. Схema системи приведена на рис. 3.1. Принципово вона містить наступні основні спеціальні частини:

- компресор 1 високого тиску стискування газу до тиску приблизно 25 МПа, необхідного для подачі газу в циліндри дизеля в кінці процесу стискування, і холодильник, що знижує температуру газу після його стискування;
- акумулятор газу високого тиску 2 спільно з сепаратором вологи;
- систему управління компресором;
- систему захисту від витоків газу і його вибуху;
- систему очищення газових трубопроводів від газу під час переходу роботи дизеля на рідке паливо.

Підведення газу здійснюється по трубопроводу з подвійними стінками (труба в трубі). На рис. 3.1 друга стінка показана пунктирними лініями. Цей захід запобігає витоку газу в машинне відділення в разі розриву труби, що підводить газ.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 66    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

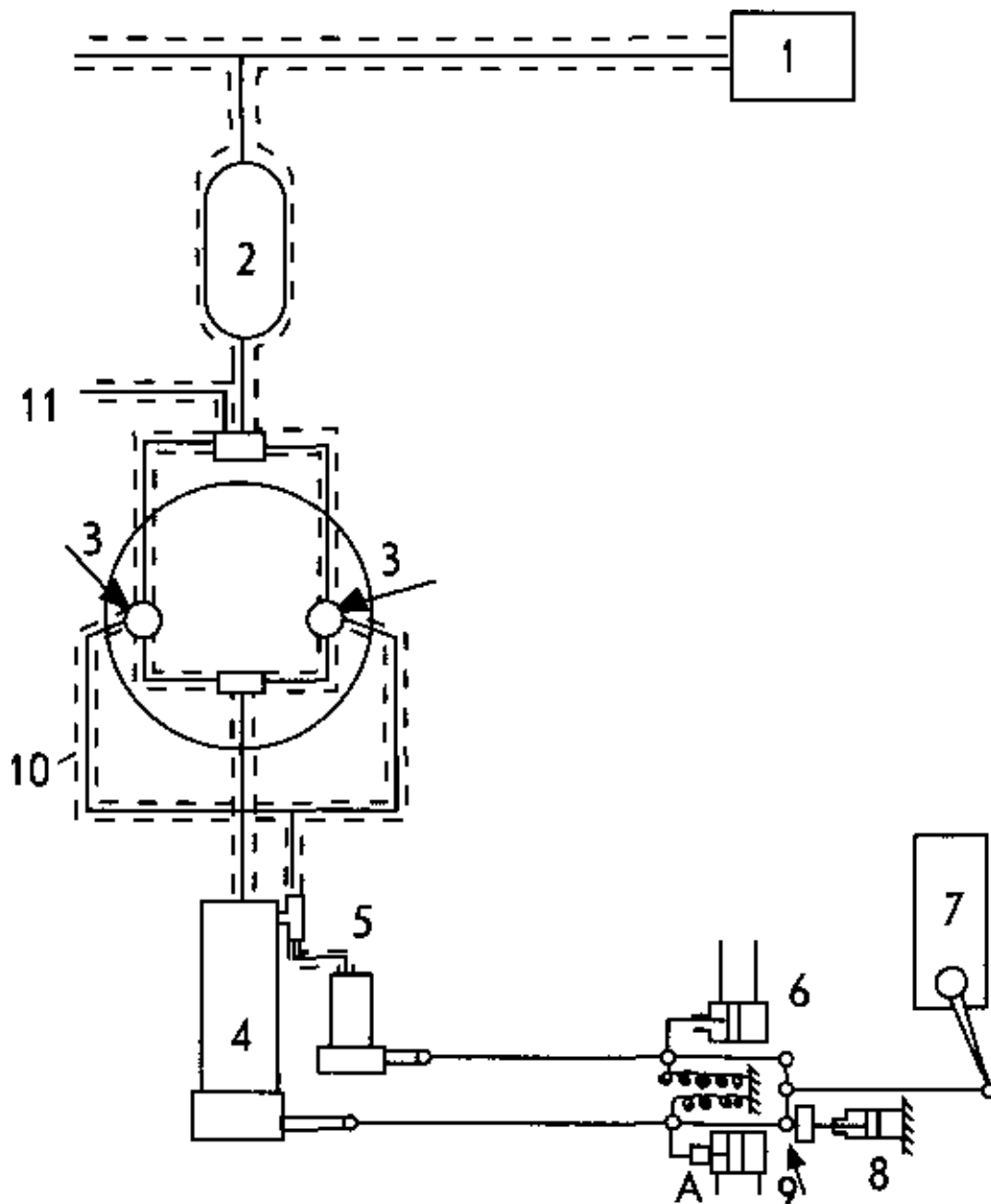


Рис. 3.1 – Схема пристрою і регулювання системи подачі газу під високим тиском двигунів: 1 - компресор з холодильником; 2 – акумулятор; 3 – двохпаливна форсунка; 4 – ПНВТ; 5 - насос управляючого масла; 6 – позиціонери; 7 – регулювальник; 8 – перемикач; 9 - важіль балансування; 10 – екран; 11 - до вентиляційної труби

Всі пуски, зупинки і перехід з роботи двигуна на газі на рідке паливо при певному навантаженні здійснюються після автоматичного продування трубопроводів інертним газом - азотом. Для запобігання утворенню вибухонебезпечної суміші в машинному відділенні в разі витоків газу

приміщення добре вентильовується і обладнується газоаналізатором з автоматичною сигналізацією про наявність газу. Простір між подвійними стінками трубопроводу з'єднується з вентиляційною системою.

Необхідні співвідношення між запальним паливом, що уприскується в циліндр, і газом досягаються за рахунок дії балансиного механізму 9, керованого регулювальником 7, і позиціонером 6.

Впорскування газу та запальної дози важкого палива буде здійснюватися однією форсункою (рис. 3.2).

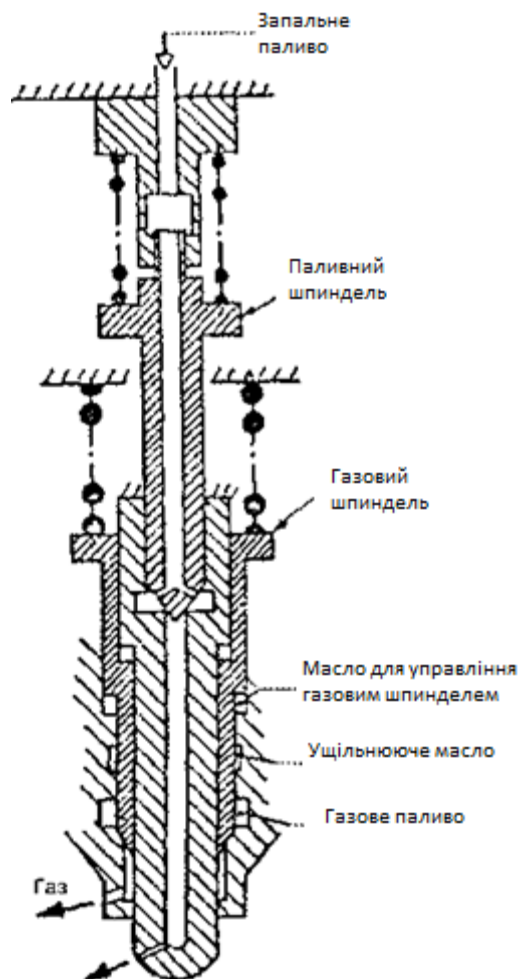


Рис. 3.2 – Схематичне зображення середовища, з якими працює двофазна форсунка з вприском газу під високим тиском

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 68    |

Управління відкриттям голок здійснюється не паливом, а маслом, що поступає від спеціального насоса. На рис. 3.2 показано схематичне зображення середовищ, з якими працює комбінована двоохпаливна форсунка.

### Розрахунок форсунки з тангенціальним виходом VOC газу

Вхідні данні для розрахунку двоохпаливної форсунки з тангенціальним виходом VOC газу представлені в табл. 3.2.

*Таблиця 3.2 – Вхідні данні для розрахунку двоохпаливної форсунки*

| Параметр                                           | Позначення         | Розмірність      | Значення |
|----------------------------------------------------|--------------------|------------------|----------|
| Потужність двигуна                                 | $N_e$              | кВт              | 3900     |
| Питома ефективна витрата палива                    | $g_e$              | кг/ кВт×год      | 0,176    |
| Частота обертання                                  | $n$                | $\text{хв}^{-1}$ | 210      |
| Кількість циліндрів                                | $i$                |                  | 6        |
| Кількість форсунок на один циліндр                 | $i_\phi$           |                  | 2        |
| Коефіцієнт тактності двигуна                       | $z$                |                  | 1        |
| Тиск газу перед форсункою                          | $P_1$              | МПа              | 25       |
| Тиск газу за форсункою                             | $P_2$              | МПа              | 12       |
| Ступінь розширення газу                            | $\pi_\phi$         |                  | 2        |
| Тривалість подачі газу                             | $\phi_{\text{вп}}$ | °ПКВ             | 25       |
| Ступінь розкриття сопла форсунки                   | $C$                |                  | 1        |
| Геометрична характеристика                         | $A$                |                  | 0,5      |
| Коефіцієнт витрати                                 | $\mu$              |                  | 0,688    |
| Коефіцієнт нерівномірності розподілу газу у факелі | $K$                | %                | 38       |
| Температура газу на вході у форсунку               | $T_1$              | К                | 353      |
| Показник політропи розширення газк                 | $k$                |                  | 1,4      |

Безрозмірний параметр форсунки

$$\Phi = \pi_{\phi} \times \sqrt{\frac{k}{k-1} \times \left( \frac{1}{\pi_{\phi}^{\frac{2}{k}}} - \frac{1}{\pi_{\phi}^{\frac{k+1}{k}}} \right)} = 2 \times \sqrt{\frac{1,4}{1,4-1} \times \left( \frac{1}{2^{\frac{2}{1,4}}} - \frac{1}{2^{\frac{1,4+1}{1,4}}} \right)} = 1,00356$$

Циклова подача газу, г/цикл

$$g_{\text{ц}} = \frac{N_e \times g_e}{60 \times n \times z \times i \times i_{\phi}} = \frac{3600 \times 0,176}{60 \times 210 \times 1 \times 6 \times 2} = 0,0045$$

Час впорскування газу, с

$$t = \frac{\varphi_{\text{en}}}{i \times n} = \frac{25}{6 \times 210} = 0,0198$$

Витрата газу, яка проходить через форсунку, кг/с

$$m = \frac{g_{\text{ц}}}{t} = \frac{0,0045}{0,0198} = 0,23$$

Діаметр сопла форсунки, мм

$$d_c = 0,948 \times \sqrt{\frac{g_{\text{ц}} \times \sqrt{R \times T_1}}{\mu \times P_2 \times \Phi}} = 0,948 \times \sqrt{\frac{0,0045 \times \sqrt{287 \times 353}}{0,688 \times 12 \times 1,00356}} = 3$$

Відносний діаметр вихрю визначаємо за графіком (рис. 3.3)

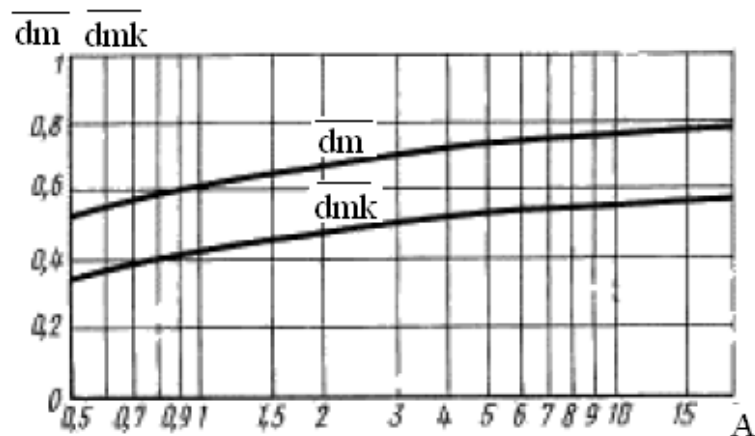


Рис. 3.3 – Залежність відносних діаметрів вихрю в соплі та біля торцевої стінки камери закручення

$$\overline{d_m} = 0,54$$

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 70    |

Середній кут факелу визначаємо за графіком (рис. 3.4)

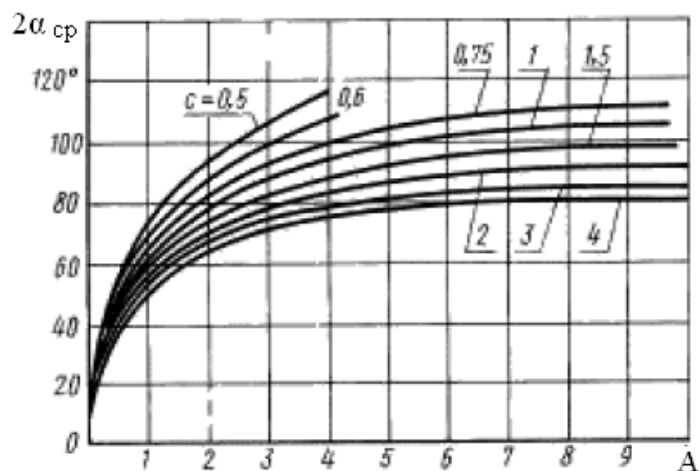


Рис. 3.4 – Залежність середнього кута факелу

$$\alpha_{\text{ср}} = 26^\circ$$

Максимальний (зовнішній) кут факелу визначаємо за графіком (рис.3.5)

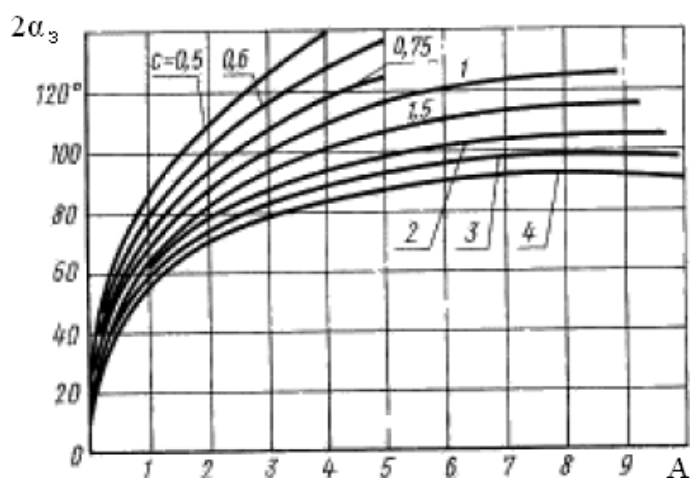


Рис. 3.5 – Залежність зовнішнього кута факелу

$$\alpha_z = 38^\circ$$

Повна швидкість виходу газу з сопла форсунки, м/с

$$\omega = 1,413 \times \frac{\mu \times \Phi \times \sqrt{R \times T_1}}{\left(1 - d_m^2\right)^{\frac{k-1}{k}} \times \pi_{\Phi}^{\frac{k}{k}} \times \cos \alpha_{\text{ср}}} = 1,413 \times \frac{0,688 \times 1,00356 \times \sqrt{287 \times 353}}{(1 - 0,54^2) \times 2^{\frac{1,4-1}{1,4}} \times \cos 26^\circ} = 395,682$$

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 71    |

Осьова швидкість виходу газу з сопла форсунки, м/с

$$\omega_a = \omega \times \cos \alpha_{cp} = 395,682 \times \cos 26^0 = 355,425$$

Тангенціальна швидкість виходу газу з сопла форсунки, м/с

$$\omega_t = \omega \times \sin \alpha_{cp} = 355,425 \times \sin 26^0 = 173,887$$

Кількість вхідних каналів визначається згідно з графіком (рис. 3.6)

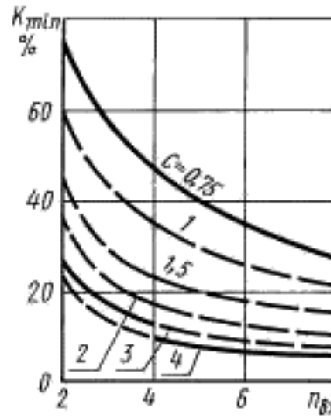


Рис. 3.6 – Залежність мінімального значення коефіцієнта нерівномірності розподілу газу в факелі форсунки довкола її вісі

$$n_{вх} = 4$$

Діаметр вхідних каналів, мм

$$d_{вх} = d_c \times \sqrt{\frac{C}{A \times n_{вх}}} = 3 \times \sqrt{\frac{1}{0,5 \times 4}} = 2$$

Радіус входу, мм

$$R_{вх} = C \times \frac{d_c}{2} = 1 \times \frac{3}{2} = 1,5$$

Діаметр камери закручування, мм

$$D_{кз} = 2 \times R_{вх} + d_{вх} = 2 \times 1,5 + 2 = 5$$

Площа перерізу вихідних отворів розпилювача, мм<sup>2</sup>

$$f = \frac{\pi \times d_{вх}^2}{4} \times n_{вх} = \frac{3,14 \times 2^2}{4} \times 4 = 12,4$$

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 72    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |



Довжина вхідних каналів, мм

$$l_{\text{вх}} = \overline{l_{\text{вх}}} d_{\text{вх}} = 1,5 \times 2 = 3$$

де  $\overline{l_{\text{вх}}} = 1 \dots 1,5$  – відносна довжина вхідних каналів.

Довжина камери закручування, мм

$$l_{\text{кз}} = \overline{l_{\text{кз}}} \times D_{\text{кз}} = 0,3 \times 5 = 1,5$$

де  $\overline{l_{\text{кз}}} = 0,1 \dots 0,3$  – відносна довжина вхідних каналів.

Довжина сопла, мм

$$l_{\text{с}} = \overline{l_{\text{с}}} \times d_{\text{с}} = 1 \times 3 = 3$$

де  $\overline{l_{\text{с}}} = 0,5 \dots 1$  – відносна довжина сопла.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 73    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

## РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

### 4.1 Охорона праці

#### Нормативно-правова та законодавча база охорони праці на суднах

Міжнародна конвенція по охороні людського життя на морі 1974 р., СОЛАС-74 (International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS-74) містить консолідований текст Конвенції СОЛАС-74, Україна – учасник Конвенції. Міжнародна конвенція по охороні людського життя на морі 1974 р. є найважливішим із всіх міжнародних договорів, що відносяться до безпеки торгових суден. Перший варіант був створений в 1914 р., другий і подальші у 1929, 1948, 1960 роках, відповідно. Основне завдання Конвенцій СОЛАС – визначення мінімальних стандартів по конструкції, устаткуванню й безпеці плавання судів. Згідно СОЛАС (Правило 21), кожен уряд зобов'язується проводити розслідування будь-якої аварії, що відбулася з будь-яким з його суден. Інформацію про результати такого розслідування повинні передавати в ІМО. Держави-учасники зобов'язалися застосовувати вимоги конвенції й Протоколу до суден держав, що не є їх учасниками, з метою того, щоб такі судна не опинилися в сприятливішому положенні, ніж їх власні.

МКУБ – Міжнародний кодекс по управлінню безпечною експлуатацією суден та запобіганням забруднення; ПДНВ-78/95 – Міжнародна конвенція про підготовку та дипломування моряків та несення вахти.

Функції, що відносяться до аварійних ситуацій, охороні праці, медичному підходу, виживанню знаходяться в наступних розділах ПДНВ.

Розділ А-VI/1. Для всіх моряків, до виконання своїх обов'язків на судні, відповідно до розділу А-VI/1 Кодексу ПДМНВ-95 обов'язкова ознайомлювальна підготовка.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 74    |

## Аналіз небезпечних і шкідливих факторів у машинному відділенні

Судно в комплексі з наявністю в ньому різного устаткування і механізмів являє собою об'єкт підвищеної небезпеки зі значною кількістю небезпечних і шкідливих факторів. До числа цих факторів відносяться:

Таблиця 4.1 - Потенційні небезпеки й шкідливі фактори на судні

| Види потенційно можливих небезпечних і шкідливих виробничих факторів                                             |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| 1. Фізичні виробничі фактори:                                                                                    |  |
| 1.1. Шкідливі:                                                                                                   |  |
| - шум;                                                                                                           |  |
| - вібрація;                                                                                                      |  |
| - наявність електромагнітних полів;                                                                              |  |
| - підвищена загазованість;                                                                                       |  |
| - підвищене виділення тепла;                                                                                     |  |
| - підвищена вологість.                                                                                           |  |
| 1.2. Небезпечні:                                                                                                 |  |
| - небезпека вибуху;                                                                                              |  |
| - небезпека виникнення пожежі;                                                                                   |  |
| - небезпека ураження електрострумом;                                                                             |  |
| - відкрито рухаються й обертаються частини машин.                                                                |  |
| 2. Хімічні виробничі фактори:                                                                                    |  |
| 2.1. Шкідливі:                                                                                                   |  |
| - подразнюючі речовини: кислоти, луги, розчинники, кислі гази.                                                   |  |
| 2.2. Небезпечні:                                                                                                 |  |
| - канцерогенні речовини: сполуки алюмінію, бензин, гас, 3,4-бенз(α)пирен (міститься у вихлопних газах двигунів). |  |
| 3. Біологічні виробничі фактори:                                                                                 |  |
| 3.1. Небезпечні:                                                                                                 |  |
| - бактерії.                                                                                                      |  |

### Заходи із забезпечення безпечних та нешкідливих умов праці на судні

Небезпека цього фактора полягає у травматизмі вахтового персоналу у зв'язку зі здійсненням різних рухів машинами, обладнанням, що знаходиться в приміщенні судна. У проекті судна передбачаються наступні міри безпеки: установка огорожень, установка запобіжних захисних засобів, призначених для автоматичного відключення агрегатів і машин, блокувальні пристрої, що виключають можливість проникнення людини в небезпечну зону, пристрої що сигналізують, що дають інформацію про роботу обладнання, а також про небезпечні і шкідливі фактори, що при цьому виникають, системи дистанційного керування, яким притаманне здійснення контролю і

регулювання роботи обладнання здійснюється з ділянок, віддалених від небезпечної зони.

**Підвищений рівень вібрації та шуму.** Систематичний вплив вібрацій машино котельному відділенні (ГД, ДГ, валопроводу і т.д.) може бути причиною вібраційної хвороби. Відповідно до ДСТ 12,1,012-78 норми по обмеженню загальних вібрацій (підлоги, сидінь і т.п.) встановлюють величину логарифмічного рівня коливальної швидкості в основних діапазонах із середньгеометричними значеннями: 2, 4, 8, 16, 32 Гц, а норма по обмеженню локальної вібрації в октавних смугах частот із середньгеометричними значеннями: 16, 32, 63, 125, 250, 500, 1000 Гц (гігієнічні норми встановлені для тривалості робочої зміни 8 годин.). Власні частоти більшості внутрішніх органів людини 6...9 Гц, голови 25...30 Гц [8].

Джерелом шуму на судні є головний двигун, дизель-генератори, допоміжні механізми, вентилятори та т.п. Для зниження шуму застосовують кожухи, глушники, звукоізоляцію, пружні ущільнювачі. Обслуговуючий персонал МВ забезпечується засобами індивідуального захисту. Для зниження вібрації машини встановлюють на амортизатори, застосовують звуковбирні матеріали. Обслуговуючий персонал забезпечується ковдрами, антивібраційними рукавицями. Джерелами, теплових випромінювань є нагріті поверхні машин, механізмів, устаткування, трубопроводів, радіостанції. Інтенсивність теплового випромінювання, що допускається, 350...500 Вт/м . Навколо працюючих механізмів у МВ виникають шкідливі теплові, електромагнітні й інші випромінювання. Джерелами шкідливих випромінювань є: нагріті поверхні машин і трубопроводів, радіостанція, радіолокаційні станції. Для захисту персоналу застосовують герметизацію та теплоізоляцію механізмів, машин, паропроводів та газопроводів.

Рівні шуму в МВ сучасних судів знаходяться в межах 105 - 117 дБ. Існують тимчасові і перехідні норми, згідно яких для захисту від дії шуму варто обмежувати час перебування в зонах дії шуму і застосовувати

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 76    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

індивідуальні засоби захисту. Вушні вкладиші послабляють рівень шуму на 20 дБ, навушники - на 30 дБ, спільне застосування - на 35 дБ.

Кодексом передбачається обов'язкове застосування попереджувальних написів у входів до приміщення, для яких рівень шуму перевищує 85 дБ.

Захист – на території з підвищеним рівнем шуму персонал має носити захисні навушники, які мають ізолювати вухо від негативного та небезпечного впливу шуму та вібрації.

**Підвищений рівень електромагнітних випромінювань.** Для захисту від впливу електромагнітних полів, створених антенами, генераторами, розподільними щитами, застосовують різні екрани, що відбивають чи поглинають електромагнітні випромінювання, використання засобів індивідуального захисту – комбінезони і халати з металізованої тканини. Рівні припустимого електромагнітного опромінення визначені ДСТ 12,1,006-76 «Електромагнітні поля радіо частот. Загальні вимоги безпеки». Як уже було зазначено, судно належить до нового покоління, на усіх небезпечних зонах були передбачені відповідні етапи захисту від електромагнітних випромінювань.

**Підвищена запиленість і загазованість.** З основних забруднень, що можуть бути присутні у МВ – вуглеводні, сірчаний і сірчистий ангідрид, у концентрації вище, ПДК діють на організм людини. По ДСТУ 12,1,005-76 установлені ПДК шкідливих речовин у повітрі робочої зони.

Захист – вентиляція, а також газо-пилоуловлюючі засоби індивідуального захисту й устаткування.

**Температура повітря, вологість, швидкість повітря.** Підвищена температура повітря в робочому приміщенні викликає швидку стомлюваність організму, перегрів. Це веде до зниження працездатності і може стати причиною травматизму. Низька температура може викликати місцеве чи загальне охолодження організму. Для підтримки нормальної температури передбачається вентиляція з підігрівником і охолоджувачем

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 77    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

повітря. Для підтримки гарного самопочуття людей немаловажне значення має температура поверхонь, огорожуючих приміщень. Щоб їхнього відпрівання вона повинна бути не нижче температури повітря в приміщенні більш ніж 6°C і не менше крапки роси.

**Освітленість.** У МВ судна застосовується штучне освітлення. Нерівномірність освітлення робочих місць підвищує стомлюваність органів зору від частої переадаптації зору – при перекладі погляду з більш освітленої поверхні на менш освітлену. Наявність тіней на робочих поверхнях, а також близькості, відбитої від робочих поверхонь устаткування. Створюють несприятливі умови для роботи органів зору. Найкращий розподіл світла на робочих місцях створює загальне освітлення. При аварійному висвітленні освітленість робочих поверхонь повинна бути не менш 25% установлених для робочого освітлення норм, а на сходінках трапа і проходах – не менш 5 лк. Норми освітленості регламентуються діючими нормами штучного освітлення на судах морського флоту ДСТ 2506-81. У МВ загальне освітлення на палубі згідно цих норм повинне бути не менш 20 лк, на шкалах приладів – 75 лк, на сходінках трапа – 20 лк.

**Запобігання пожежі на судні.** Головною метою боротьби з пожежею є – швидке взяття її під контроль та гасіння, яке можливе лише в тому випадку, коли вогнегасний засіб доставлений до пожежі швидко й в достатній кількості. Це можливо забезпечити за допомогою стаціонарних систем пожежогасіння.

Вуглекислий газ - широко розповсюджений засіб пожежогасіння на судах. Ліквідація пожеж у суднових приміщеннях вуглекислим газом здійснюється методом об'ємного гасіння. Для підвищення ефективності гасіння рекомендується герметизація приміщенні, у яких застосовується вуглекислота.

Будучи в 1,5 рази важчим за повітря, вуглекислий газ може проникати в місця, важко доступні для інших засобів пожежогасіння під плити

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 78    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

машинних і котельних відділень, в обмежені простори вантажних трюмів, танків, паливних цистерн, спеціальних суднових комор, і т.д.

На судах вуглекислота зберігається в сталевих балонах місткістю

30-40 л, у яких вона перебуває в рідкому стані. Для суднових систем вуглекислотного пожежогасіння, що працюють при тиску порядку 12,5 МПа, прийнято використовувати стандартні балони місткістю 40 л, що містять по 25 кг вуглекислоти. Балони розміщують групами по 8–16 шт. у вертикальному положенні головками нагору. Вони повинні бути надійно закріплені в місцях, розташованих удалині від житлових і службових приміщень, тому що вуглекислота ставиться до задущливых газів і при високій концентрації в повітрі (22% і вище) небезпечна для життя.

При виході з балонів і раптовому розширенні вуглекислота випаровується, перетворюючись у газ. При цьому обсяг її збільшується більш ніж в 500 разів. Частина вуглекислоти в результаті переохолодження переходить у твердий стан – сніжні пластівці, які, потрапляючи у вогнище горіння, миттєво перетворюються в газ. Вуглекислий газ, опускаючись до вогнища пожежі й обволікаючи палаючі речовини й предмети, витісняє повітря й знижує в такий спосіб зміст кисню в зоні горіння. У зв'язку із цим горіння припиняється. Ефективність пожежогасіння досягається при досить високій концентрації вуглекислоти в атмосфері приміщення (22-23%).

### **Розрахунок приточно-витяжної вентиляції в машинно-котельному відділенні**

Загальна кількість повітря, що подається в машинне відділення, визначається за рівнянням

$$L_{\Pi} = \frac{\Sigma Q_{над}}{C_{\Pi} \times \rho_{\Pi} \times \Delta t}, \text{ м}^3/\text{год.},$$

де  $\Sigma Q_{над}$  - сумарні надлишкові тепловиділення в повітря працюючими механізмами, кДж/год.;

$C_{\Pi} = 1,01$  - питома теплоємність повітря, кДж/(кг×°C);

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           | 79    |

$\Delta t$  - різниця температур повітря в МВ і зовнішнього, згідно санітарним нормам, °C;

$\rho_{\Pi}$  - щільність повітря при зовнішній температурі, кг/м<sup>3</sup>

$$\rho_{\Pi} = \frac{\rho_0}{1 + \frac{t_H}{273}}$$

де  $\rho_0 = 1,293$  - щільність повітря при нормальних умовах, кг/м<sup>3</sup>;

$t_H$  - температура зовнішнього повітря, приймається в залежності від району плавання судна по ГОСТ 24389-80, °C.

Надлишкове тепловиділення визначаються за виразами для ДВЗ

$$Q_{ДВЗ} = 0,02 \times g_e \times Ne^{ДВЗ} \times Q_{ниж}, \text{ кДж/год.},$$

$$Q_{ДВЗ}^1 = 0,02 \times 0,176 \times 3900 \times 42700 = 586185,6 \text{ кДж/год.},$$

де  $Ne^{ДВЗ}$  – потужність двигуна, кВт;

$g_e$  – питома витрата палива, кг/кВт×год;

$Q_{ниж}$  – нижча теплота згоряння, кДж/кг;

Щільність повітря при зовнішній температурі 20 °C

$$\rho_{\Pi} = \frac{1,293}{1 + \frac{20}{273}} = 1,204 \text{ кг/м}^3;$$

Загальна кількість повітря, що подається в машинне відділення

$$L_{\Pi} = \frac{586185,6}{1,01 \times 1,204 \times 20} = 24102 \text{ м}^3/\text{год}$$

Кратність циркуляції

$$n = \frac{L_{\Pi}}{V_M} = \frac{24102}{4984} = 4,8$$

де  $V_M$  – об'єм машинного відділення.

Цей розрахунок виконаний з метою визначення необхідної кількості циркулюючого повітря в машинному відділенні згідно загальних санітарно-

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 80    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |



гігієнічних умов даної кількості циркулюючого повітря вистачає для підтримки метеорологічних умов на оптимальному рівні а встановленої потужності вентиляторів марки SMC8 – 100 дозволяють підтримувати необхідні параметри в межах 40...60 % при наявності повітряного опалення, у літню пору нормалізується. Для підтримки необхідних параметрів повітря у МКВ на судні застосована система приливно-витяжної вентиляції та опалення.

Мікроклімат у машинному відділенні визначається наступними параметрами: вологість, температура, рухливість повітря, тиск повітря, теплота, що виділяється від нагрітого повітря, устаткування та механізмів.

Підвищена температура повітря в робочому приміщенні викликає швидку стомлюваність організму, перегрів. Це веде до зниження працездатності і може стати причиною травматизму. Низька температура викликати місцеве чи загальне охолодження організму. Для підтримки нормальної температури передбачається вентиляція з підігрівником і охолоджувачем повітря. Для гарного самопочуття людей немаловажне значення має температура робочих поверхонь. Щоб уникнути їхнього вона повинна бути не нижче температури повітря в приміщенні більш ніж 6°C и не менше крапки роси.

## 4.2 Охорона навколишнього середовища

### Нормативно-правова та законодавча база охорони навколишнього, морського середовища

Екологічне законодавство - це структура, що об'єднує екологічні юридичні норми різного рівня і різної спрямованості. Ними можуть бути норми конституційні, звичайні, норми, орієнтовані на соціальні відносини різного змісту, з приводу охорони різних природних об'єктів. Її реалізація породжує відносно сталі правові відносини. Згідно з Конвенцією

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 81    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

ООН по морському праву (1982 г.) організаційно-правові документи підрозділяються на:

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

(згідно з Конвенцією ООН по морському праву (1982 г)).

Міжнародна правова охорона навколишнього природного середовища ґрунтується на певних принципах, вироблених спільними зусиллями держав, міжнародних організацій і конференцій. Вони сформульовані в окремих рішеннях міжнародних організацій, документах конференцій, а також обов'язково викладені в національному законодавстві. В узагальненому вигляді до цих принципів належать пріоритетність екологічних прав людини, суверенні права держави на природні ресурси в межах її території, вільний обмін міжнародною екологічною інформацією; взаємодопомога держав при надзвичайних обставинах (екологічних катастрофах тощо), неприпустимість екологічного благополуччя однієї держави внаслідок заподіяння екологічної шкоди іншій та ін [9].

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, та відповідальність у випадку аварії на танкерах, що спричинила вилив нафтопродуктів.

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

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 82    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

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 додатків до основного тексту конвенції.

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 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 Конвенції 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 загрозової їх узбережжю небезпеки

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 83    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

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. 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)).

### **Вплив судна на навколишнє середовище**

Шкода судноплавства на Світовий океан пояснюється впливом самого водного транспорту, та ще більше тими викидами які ним здійснюються. Це і забруднення нафтою та сільськогосподарськими хімікатами, радіоактивними продуктами, важкими металами і найрізноманітнішим сміттям, яке викидають з суден. В міру зростання перевезень нафтовантажів і наливного тоннажу все більша кількість нафти стала потрапляти в океан і при аваріях. Кінець XX століття був відмічений кількома великими екологічними катастрофами, котрі трапилися, незважаючи на заходи, що вживаються для безпечного мореплавства, особливо танкерів. За даними океанологів 28% нафти й інших вуглеводнів, які потрапляють в океани надходять з суден, що знаходяться у морі.

Забруднені речовини, які потрапили в океан, з часом мігрують і збільшують свої концентрації. Все це зумовлює поступову деградацію морських біоценозів, викликає різні захворювання живих організмів. Окремі з них здатні нагромаджувати шкідливі компоненти в значних обсягах:

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 84    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

макрофіти, фітопланктон — свинець і ртуть, молюски і ракоподібні — кадмій та ін.

На прикладі цієї магістерської роботи ми можемо побачити та зробити висновки про доцільність впровадження газогенератора в систему СЕУ, принцип дії якого полягає у газифікації відходів сепарації та зменшенню їх кількості приблизно на 50%. Що в свою чергу дозволяє скоротити витрати на утилізацію цих відходів та підвищити екологічні показники самого процесу утилізації, т.к. майже всі шкідливі речовини повертаються на догоряння в головний двигун.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 85    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

## ВИСНОВКИ

У ході підготовки та написання даної магістерської роботи було проаналізовано конструктивні особливості двотактного малообертового двигуна 6L35MC (6ДКРН35/105), проведено аналіз сучасних способів підвищення паливної економічності двигунів. В результаті проведеного аналізу було встановлено, що одним з перспективних способів є використання газового палива. Це дозволяє покращити не тільки економічні, але і екологічні показники двигунів. Розрахунки робочого процесу двигуна підтвердили доцільність такої модернізації. Питома витрати важкого палива зменшилася при 100% навантаженні з 176 г/кВт×год для базового двигуна до 14,5 г/кВт×год при роботі за газорідним циклом з використанням VOC газу.

Також були розглянуті основні проблеми переведення суднових двигунів на газове паливо та заходи по забезпеченню безпеки. Була спроектована та розрахована система подачі та впорскування VOC газу у двигун. Проведені розрахунки двофазової форсунки з тангенціальним виходом VOC газу.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 86    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

## ЛІТЕРАТУРА

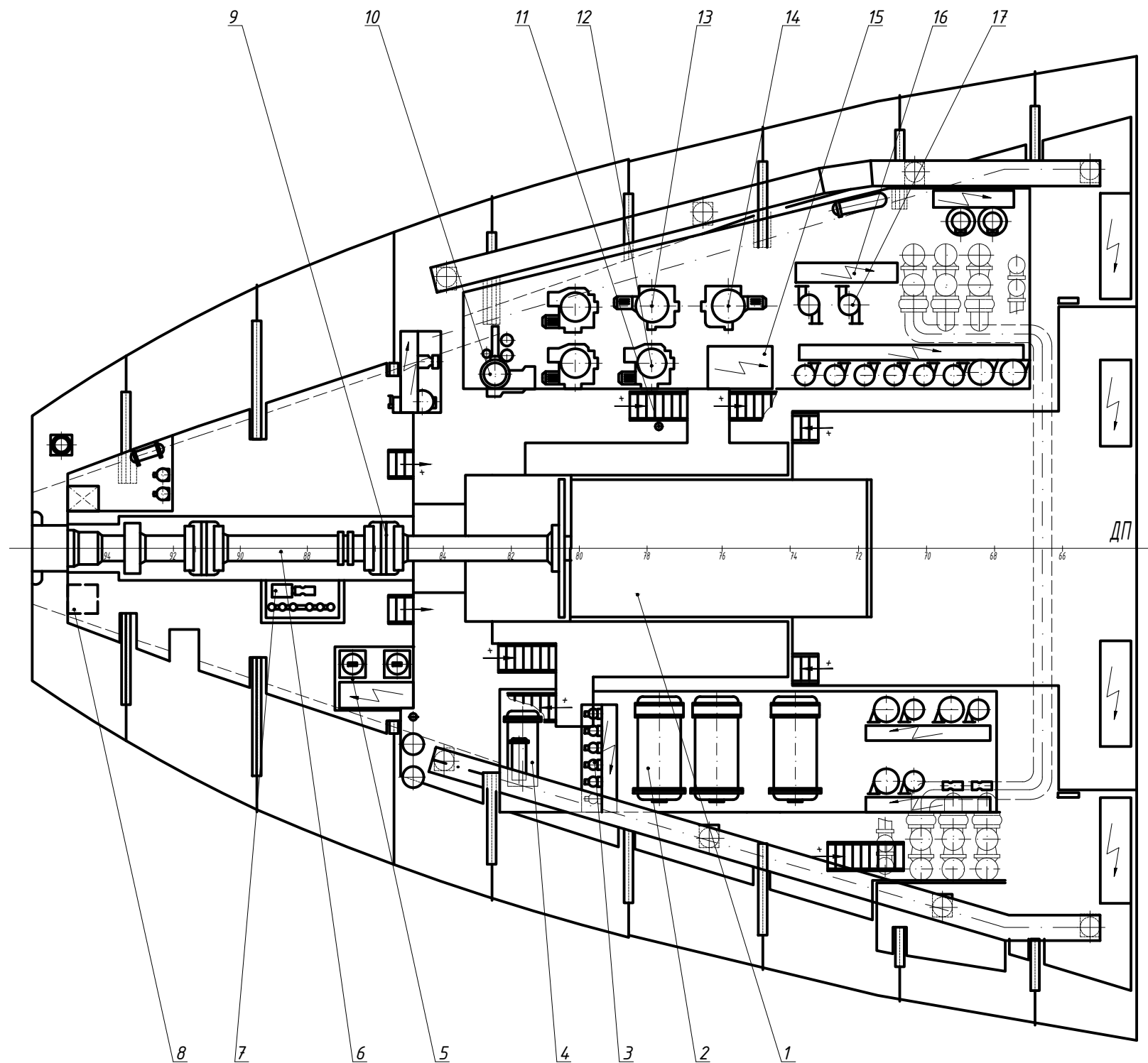
1. Наливайко В. С., Тимошевський Б. Г., Ткаченко С. Г. Суднові двигуни внутрішнього згоряння: підр. Миколаїв: Вид-во Торубара В.В., 2015. 332 с.
2. Методичні вказівки до виконання розрахунку робочого процесу дизельного двигуна з дисципліни «Теорія ДВЗ» // Доценко С.М., Діденко О.В - Первомайськ ППІ НУК, 2012. – 40с.
3. Bilousov I., Bulgakov M., Savchuk V. Modern Marine Internal Combustion Engines. Springer Series on Naval Architecture, Marine Engineering, Shipbuilding and Shipping, Springer, Cham., 2020. XIII, 385 p., <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49749-1>.
4. Двигуни внутрішнього згоряння. Теорія [Текст]: Підручник / В.Г. Дяченко. – Харків: НТУ “ХПІ”, 2008. – 488 с.
5. Двигуни внутрішнього згоряння [Електронний ресурс]: Серія підручників у 6 томах. Т.1. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин. Харків: Видавн. центр НТУ "ХПІ", 2004. – 492 с. .
6. Використання рослинної олії в якості палив в середньо оборотному дизельному двигуні. Швець І., Грабовенко О., Доценко С., Нестеренко В. Двигуни внутрішнього згоряння. – 2021. № 2. С.79–86.
7. Говорун А.Г. Конструкція та динаміка двигунів : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл., які навч. за напрямом «Інженерна механіка» / А.Г. Говорун, А.О. Корпач. – К. : НТУ, 2007. – 124 с. ISBN 966-632-081-9.
8. Голубченко Г.А. “Розрахунок рівня шуму в суднових приміщеннях”.
9. Білявський Г.О. Основи загальної екології : підручник / Г.О. Білявський, М.М. Падун, Р.С. Фурдуй. – 2-е вид. зі змінами. – К. : Либідь, 1995. – 368 с.
10. Гутаревич Ю.Ф. Випробування двигунів внутрішнього згорання: навчальний посібник / Ю.Ф. Гутаревич, А.О. Корпач, А.Г. Говорун. – К.: НТУ, 2013. – 249 с.

|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 87    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |

ДОДАТКИ

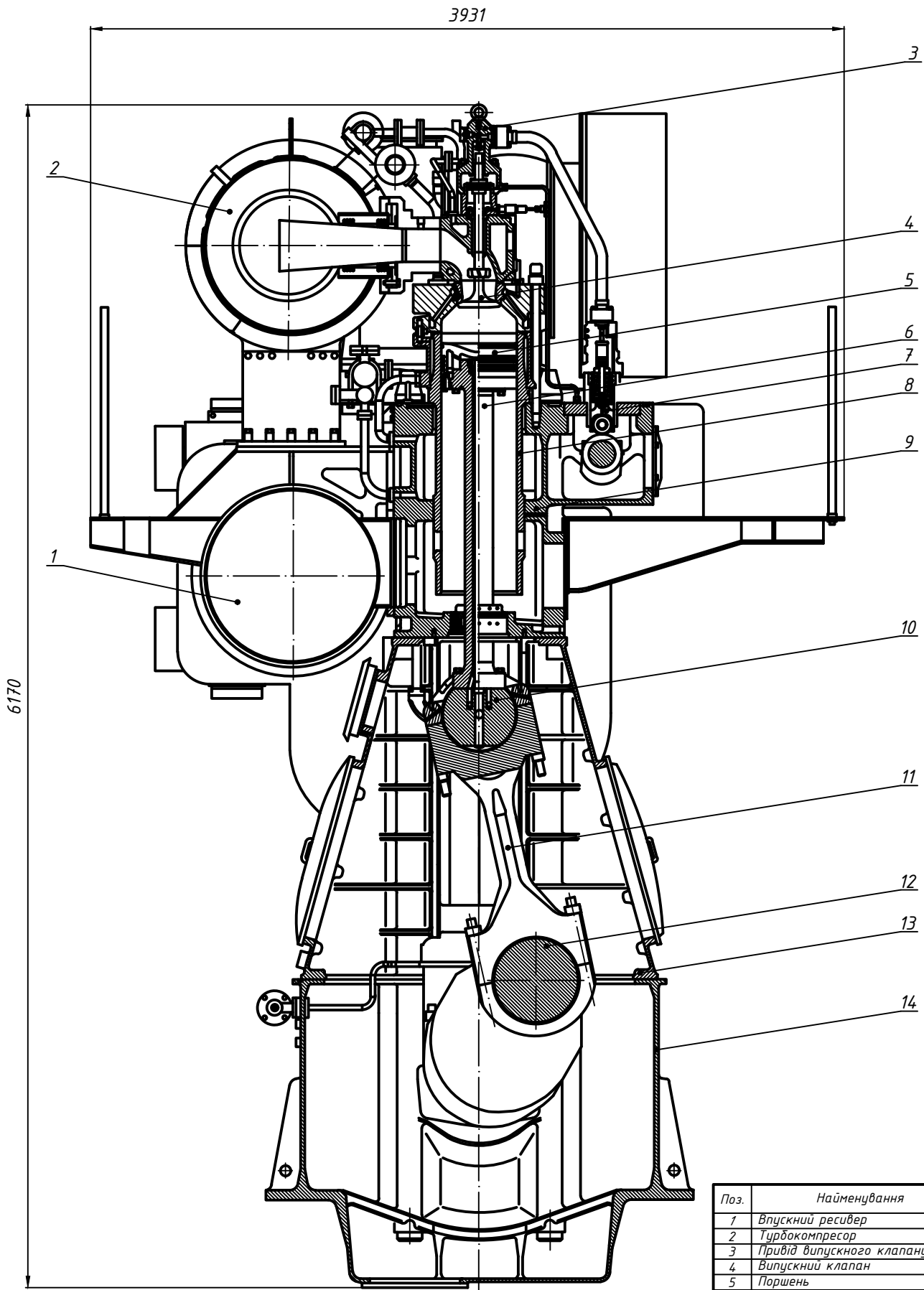
|    |       |          |        |      |                           |       |
|----|-------|----------|--------|------|---------------------------|-------|
|    |       |          |        |      | ПННІ НУК 131.61.23.24. ПЗ | Аркуш |
|    |       |          |        |      |                           | 88    |
| Зм | Аркуш | № докум. | Підпис | Дата |                           |       |





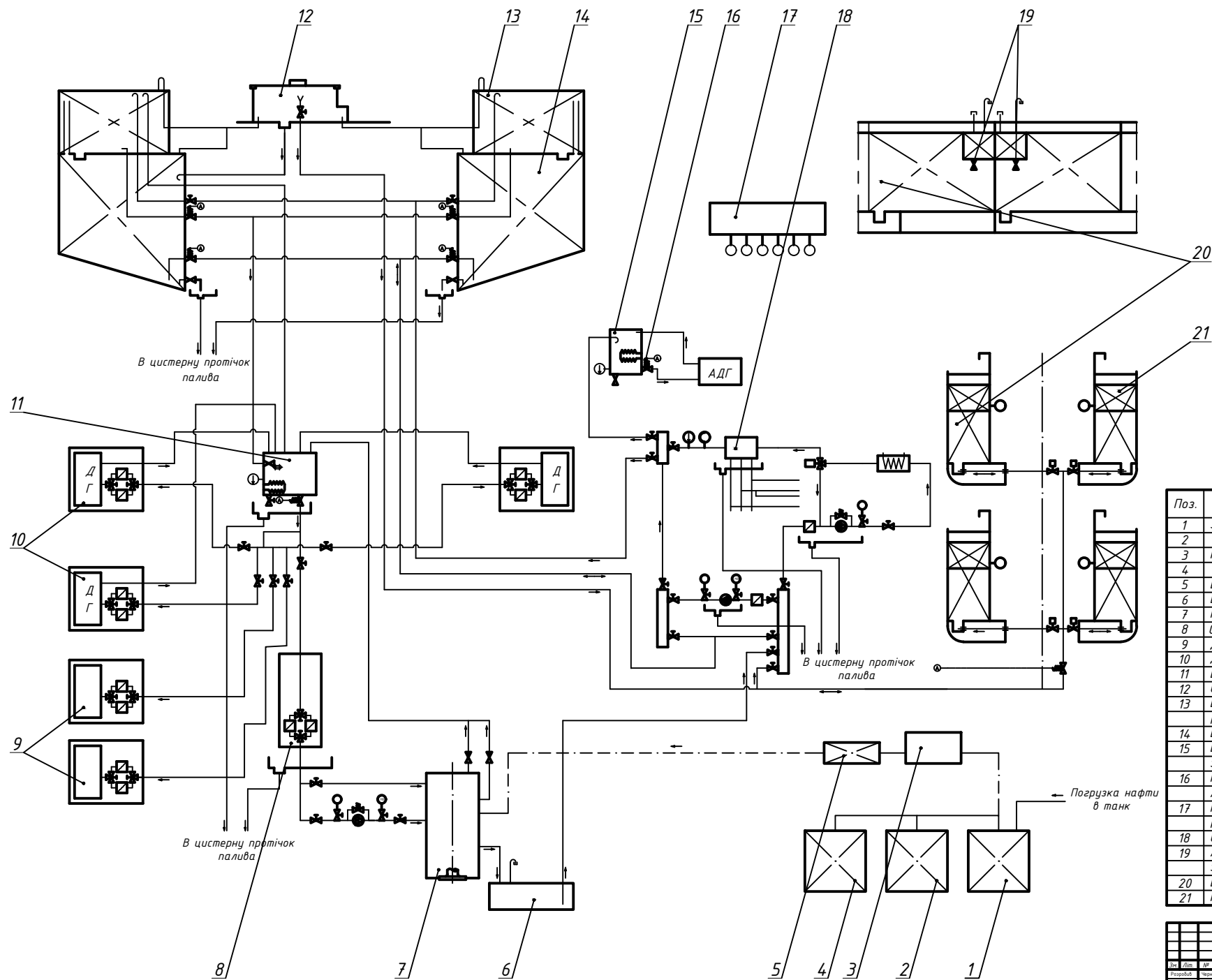
| Поз. | Найменування           | Кіл. | Примітки |
|------|------------------------|------|----------|
| 1    | Головний двигун        | 1    |          |
| 2    | Цистерна теплої води   | 3    |          |
| 3    | Повітряні балони       | 12   |          |
| 4    | Цистерна               | 1    |          |
| 5    | Сепаратор              | 2    |          |
| 6    | Валопровід             | 1    |          |
| 7    | Насос                  | 1    |          |
| 8    | Аварійний вихід        | 1    |          |
| 9    | Упорний підшипник      | 1    |          |
| 10   | Паливний насос         | 1    |          |
| 11   | Вогнегасник ОУ-8       | 18   |          |
| 12   | Пожежний насос         | 1    |          |
| 13   | Баластний насос        | 1    |          |
| 14   | Осушувальний насос     | 1    |          |
| 15   | Розподільчий щит       | 1    |          |
| 16   | Кородка опорів насосів | 1    |          |
| 17   | Допоміжний насос       | 2    |          |

|                           |                  |          |        |       |  |                                                           |   |       |      |        |
|---------------------------|------------------|----------|--------|-------|--|-----------------------------------------------------------|---|-------|------|--------|
| ПННН НУК 131.61.23.24.01. |                  |          |        |       |  | Загальне розміщення механізмів у МВ танкера проекту 17120 |   |       | Лист | Листів |
| Вра                       | Лист             | № докум. | Підпис | Печат |  | Н                                                         | М | 1:200 |      |        |
| Розроб                    | Червонова Т.О.   |          |        |       |  |                                                           |   |       |      |        |
| Перевір                   | Поліщук А.С.     |          |        |       |  |                                                           |   |       |      |        |
| Н. м.                     | Поліщук А.С.     |          |        |       |  |                                                           |   |       |      |        |
| Замов                     | Васильченко В.В. |          |        |       |  |                                                           |   |       |      |        |



| Поз. | Найменування                   | Кіл | Примітки |
|------|--------------------------------|-----|----------|
| 1    | Впускний ресивер               | 1   |          |
| 2    | Турбокомпресор                 | 1   |          |
| 3    | Привід випускного клапану      | 6   |          |
| 4    | Впускний клапан                | 6   |          |
| 5    | Поршень                        | 6   |          |
| 6    | Шток поршня                    | 6   |          |
| 7    | Модулятор гідроприводу клапану | 6   |          |
| 8    | Втулка циліндру                | 6   |          |
| 9    | Сорочка циліндру               | 6   |          |
| 10   | Крейцкопф                      | 6   |          |
| 11   | Шатун                          | 6   |          |
| 12   | Колінчастий вал                | 1   |          |
| 13   | Станіна                        | 1   |          |
| 14   | Фундаментна рама               | 1   |          |

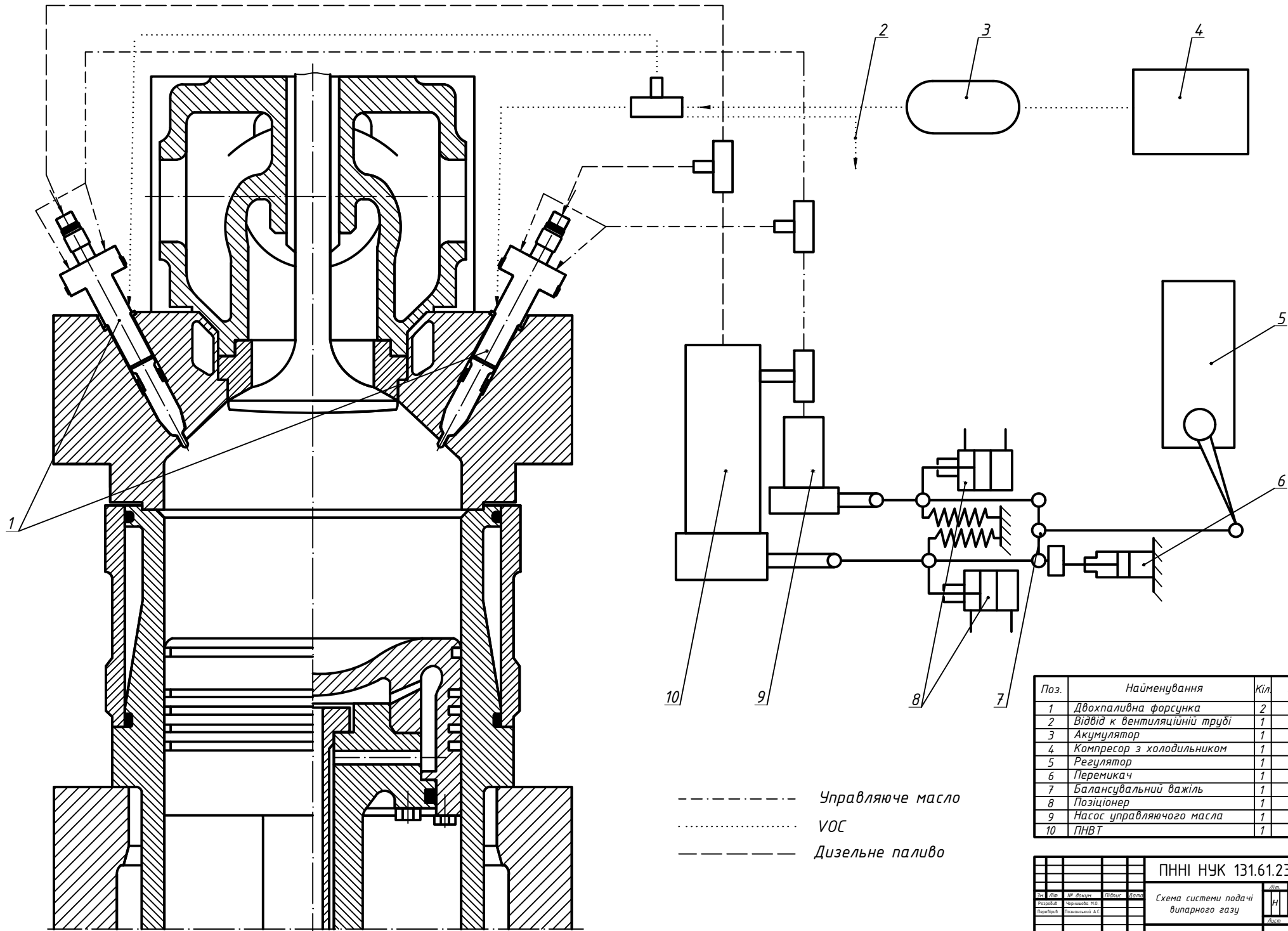
|                           |                 |          |        |                            |        |         |           |
|---------------------------|-----------------|----------|--------|----------------------------|--------|---------|-----------|
| ПННН НУК 131.61.23.24.02. |                 |          |        | Двигун 6L35MC<br>у розрізі |        |         | Лист 1:10 |
| Зм.                       | Кол.            | № докум. | Підпис | Віст                       | Маса   | Масштаб |           |
| Розробка                  | Начальник КД    |          |        | Н                          |        | 1:10    |           |
| Перевір.                  | Інженерний А.С. |          |        | Лист                       | Листів |         |           |
| Н. монт.                  | Технічний А.С.  |          |        | 61-ТЕМмаг-22               |        |         |           |
| Замовлює                  | Інженер В.В.    |          |        |                            |        |         |           |

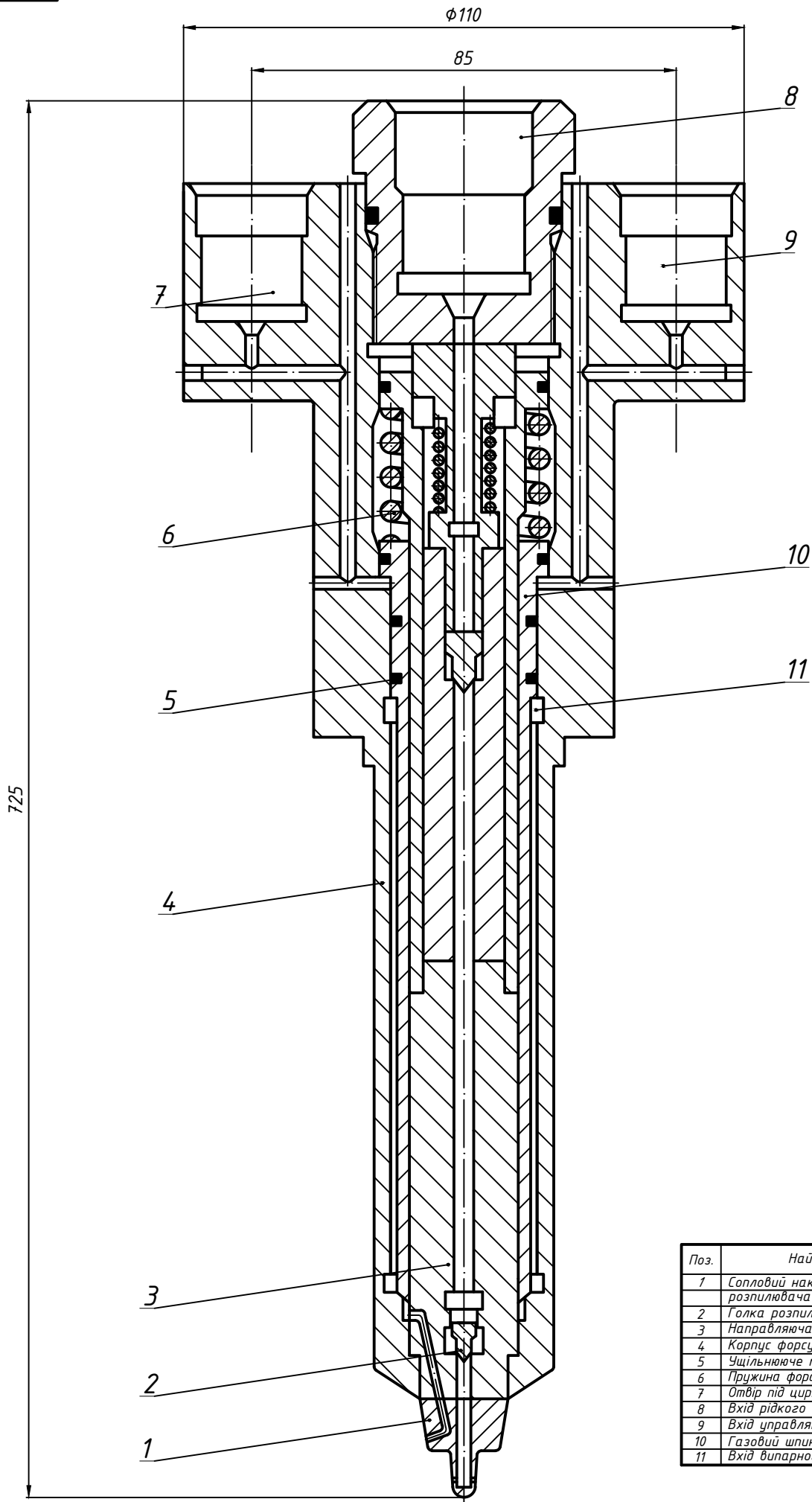


| Поз. | Найменування                                   | Кіл. | Примітки |
|------|------------------------------------------------|------|----------|
| 1    | Загрузочний танк                               | 1    |          |
| 2    | Танк з нафтою                                  | 1    |          |
| 3    | Конденсатор VOS                                | 1    |          |
| 4    | Танк з інертним газом                          | 1    |          |
| 5    | Цистерна з рідким VOS                          | 1    |          |
| 6    | Цистерна зворотнього палива                    | 1    |          |
| 7    | Головний двигун                                | 1    |          |
| 8    | Станція очищення палива                        | 2    |          |
| 9    | Допоміжні котли                                | 2    |          |
| 10   | Допоміжні дизель-генератори                    | 3    |          |
| 11   | Електронагрівач                                | 1    |          |
| 12   | Станція заправки палива                        | 1    |          |
| 13   | Цистерна добового запасу палива                | 1    |          |
| 14   | Відстійна цистерна                             | 1    |          |
| 15   | Електронагрівач добового запасу палива         | 1    |          |
| 16   | Клапан аварійного включення АДГ                | 1    |          |
| 17   | Пульт дистанційного керування клапанами в МВ   | 1    |          |
| 18   | Сепаратор палива                               | 3    |          |
| 19   | Автоматичні клапани переливу з цистерни запасу | 2    |          |
| 20   | Цистерна запасу палива                         | 1    |          |
| 21   | Переливна цистерна                             | 1    |          |

|                          |                    |          |        |       |      |        |         |
|--------------------------|--------------------|----------|--------|-------|------|--------|---------|
| ПНН НУК 131.61.23.24.03. |                    |          |        | Лист  |      |        |         |
| Вид                      | Лист               | № докум. | Підпис | Печат | Лист | Маск   | Масштаб |
| Розроб                   | Червова Т.О.       |          |        |       | Н    |        | δ/м     |
| Перевір                  | Петрушинський А.С. |          |        |       | Лист | Листів |         |
| Н. контр.                | Петрушинський А.С. |          |        |       |      |        |         |
| Замовник                 | Навчально-вироб.   |          |        |       |      |        |         |

Схема паливної системи





| Поз. | Найменування                    | Кіл. | Примітки |
|------|---------------------------------|------|----------|
| 1    | Сопловий наконечник розпилювача | 1    |          |
| 2    | Голка розпилювача               | 1    |          |
| 3    | Направляюча голки               | 1    |          |
| 4    | Корпус форсунки                 | 1    |          |
| 5    | Ущільнює масло                  | 1    |          |
| 6    | Пружина форсунки                | 1    |          |
| 7    | Отвір під циркуляційний клапан  | 1    |          |
| 8    | Вхід рідкого палива             | 1    |          |
| 9    | Вхід управляючого масла         | 1    |          |
| 10   | Газовий шпindel                 | 1    |          |
| 11   | Вхід випарного газу             | 1    |          |

|                           |                  |          |        |      |                      |  |  |       |      |         |
|---------------------------|------------------|----------|--------|------|----------------------|--|--|-------|------|---------|
| ПННІ НУК 131.61.23.24.05. |                  |          |        |      | Двухпаливна форсунка |  |  | Лист  | Маса | Масштаб |
| Зм.                       | Лист             | № докум. | Підпис | Дата | Н                    |  |  | 2,5:1 |      |         |
| Виробник                  | Черкаський НР    |          |        |      |                      |  |  |       |      |         |
| Приймач                   | Політехнічний АТ |          |        |      |                      |  |  |       |      |         |
| Н. квалі.                 | Політехнічний АТ |          |        |      |                      |  |  |       |      |         |
| Замовник                  | Містечко ВВ      |          |        |      |                      |  |  |       |      |         |