

УДК 629.5.03-8  
Г 67

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПАЛИВОПІДГОТОВКИ У СУДНОВИХ ВИПАРНИКАХ ЗРІДЖЕНОГО ПРИРОДНОГО ГАЗУ

В. М. Горбов, канд. техн. наук, проф.;  
В. С. Мітенкова, канд. техн. наук;  
К. В. Слюсаренко, магістр

*Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв*

**Анотація.** Розроблені математичні моделі процесів паливопідготовки зрідженого природного газу (ЗПГ) у суднових енергетичних установках (СЕУ). Наведені дані про вплив умов зберігання ЗПГ та часу перебігу процесу регазифікації на основні показники випарників для двопаливних двигунів різних моделей. Подані попередні рекомендації щодо вибору типу теплообмінників для паливних систем ЗПГ суднових енергетичних установок.

**Ключові слова:** зріджений природний газ, регазифікація, математична модель, льодогенератор, легкокиплячий теплоносіє, випарник.

**Аннотация.** Разработаны математические модели процессов топливоподготовки сжиженного природного газа (СПГ) в судовых энергетических установках (СЭУ). Приведены данные о влиянии условий хранения СПГ и времени протекания процесса регазификации на основные показатели испарителей для двухтопливных двигателей различных моделей. Поданы предварительные рекомендации по выбору типа теплообменников для топливных систем СПГ судовых энергетических установок.

**Ключевые слова:** сжиженный природный газ, регазификация, математическая модель, ледогенератор, легкокипящий теплоноситель, испаритель.

**Abstract.** Mathematical models for fuel handling processes of liquefied natural gas (LNG) in ship power plants (SPP) are developed. The data about the influence of LNG storage conditions and time of regasification process on the basic parameters of regasifiers for various models of dual-fuel engines are shown. The preliminary recommendations for choosing the type of the heat exchangers for liquefied natural gas fuel (NGF) systems of ship power plants are given.

**Keywords:** liquefied natural gas, regasification, mathematical model, ice generator, low-boiling heat transfer agent, evaporator.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

У сучасній енергетиці виникли серйозні проблеми з використанням нафтових палив. Одним з напрямків їх вирішення є перехід до альтернативних палив. У водному транспорті цю *актуальну проблему* можна розв'язати шляхом застосування зрідженого природного газу як основного палива для дизельних двигунів СЕУ [7–9].

### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Питання переходу водного транспорту на ЗПГ є відносно новим, тому особливостям паливних систем енергетичних установок суден, непризначених для перевезення ЗПГ, не приділялося достатньої уваги [4, 10, 11].

Проблеми при проектуванні систем паливопідготовки в СЕУ головним чином пов'язані з відсутністю методик моделювання й розрахунків процесів паливопідготовки, конкретних рекомендацій для підбору обладнання систем та визначення їх основних параметрів [5, 6]. Характер зміни важливих показників процесів паливопідготовки відрізняється для різної сукупності вхідних параметрів та потребує систематизації. Відсутній чіткий механізм оцінювання

раціональних схемних рішень систем з урахуванням особливостей СЕУ, призначення судна тощо.

**МЕТА СТАТТІ** — розробка математичних моделей процесів паливопідготовки та аналіз основних характеристик обладнання СЕУ, в якому здійснюється регазифікація ЗПГ перед подачею до двигуна.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Дослідження пов'язане з розробкою адекватних математичних моделей для двох типів випарників ЗПГ: теплообмінника типу «труба в трубі» з легкокиплячим теплоносієм та ємнісного регазифікатора-льодогенератора. Були проведені розрахунки для п'яти моделей двопаливних (dual-fuel) двигунів фірми Wärtsilä (6R32DF, 6L50DF, 9L50DF, 12V50DF, 18V50DF) при тиску зберігання ЗПГ в інтервалі 0,1...1,2 МПа.

У паливній системі з регазифікатором типу «труба в трубі» (рис. 1) ЗПГ із двостінної цистерни 1 циркуляційним насосом 2 подається до випарника 3, в якому випаровується. Отриманий природний газ (ПГ) при температурі та тиску насичення проходить крізь віддільник рідкої фази 4. Далі ПГ підігривається у теплообміннику 5 до температури подачі палива 0...60 °С, після чого через регулятор тиску 6 поступає безпосередньо до головного двигуна (ГД) 7.

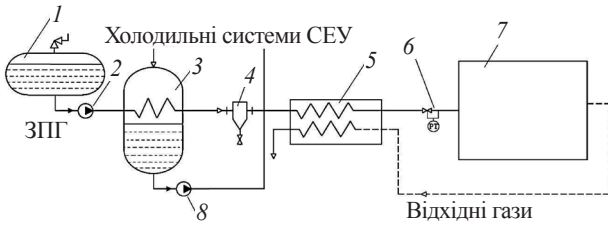


Рис. 1. Принципова схема паливної системи ЗПГ із регазифікатором типу «труба в трубі» з легкокиплячим теплоносієм

Холодоагент подається циркуляційним насосом 8 у холодильні системи.

Ураховуючи обмеження щодо використання фреонів, за легкокиплячий теплоносієм було обрано холодоагент R410A, який виступає як заміник R22 та знайшов застосування в суднових умовах [2, 3].

Математична модель регазифікатора типу «труба в трубі» з легкокиплячим теплоносієм у загальному вигляді складається з рівнянь, що описують процеси у регазифікаторі ЗПГ — конденсаторі хладону.

В основу моделі покладена система двох нелінійних диференціальних рівнянь вигляду:

$$\frac{dh_1}{dl} = \frac{\pi dk}{G_1}(t_2 - t_1);$$

$$\frac{dh_2}{dl} = \frac{\pi dk}{G_2}(t_2 - t_1),$$

де  $h$  — ентальпія, Дж/кг;  $d, l$  — відповідно діаметр та довжина труби, в якій рухається ЗПГ, м;  $k$  — коефіцієнт теплопередачі випарника, Вт/(м<sup>2</sup>·°C);  $G$  — масова подача газу, кг/с;  $t$  — температура, °C; індекси 1, 2 використані на позначення гарячого (хладону) та холодного (ЗПГ) потоків відповідно.

Граничні умови системи (при  $l=0 \rightarrow h_1(0)=h_{10}, h_2(0)=h_{20}$ , відповідають значенню ентальпії на вході до випарника.

Методика розрахунку регазифікатора подана у вигляді блок-схеми (рис. 2), на якій застосовуються наступні позначення:  $N_e^{ГД}$  — ефективна потужність ГД, кВт;  $g_e^{ГД}$  — питома витрата палива у ГД, кг/(кВт·год);  $G$  — масова витрата газу, кг/с;

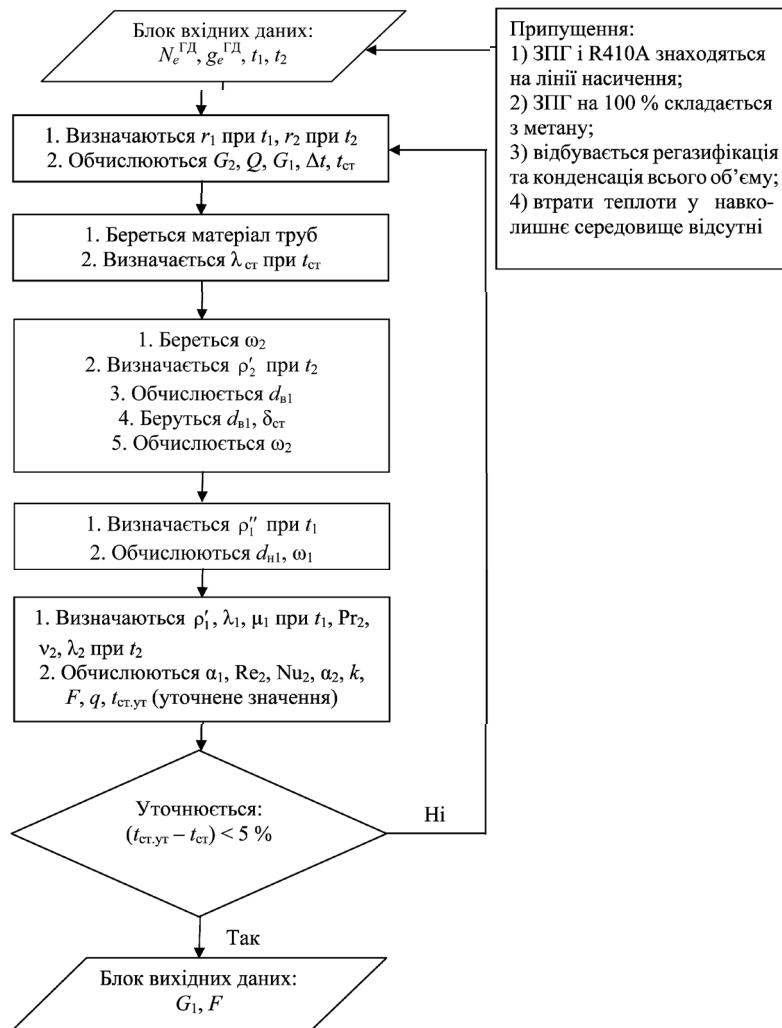


Рис. 2. Блок-схема моделі регазифікатора типу «труба в трубі» з легкокиплячим теплоносієм

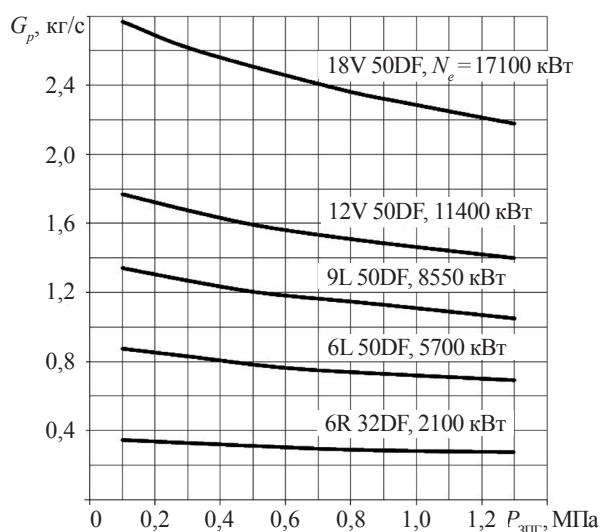


Рис. 3. Залежність витрати теплоносія  $G_p$  від тиску зберігання ЗПГ у цистернах  $P_{зпг}$

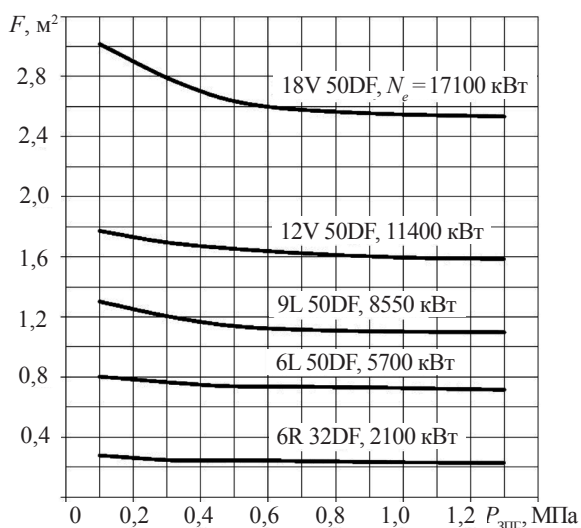


Рис. 4. Залежність площі поверхні нагріву  $F$  від тиску зберігання ЗПГ у цистернах

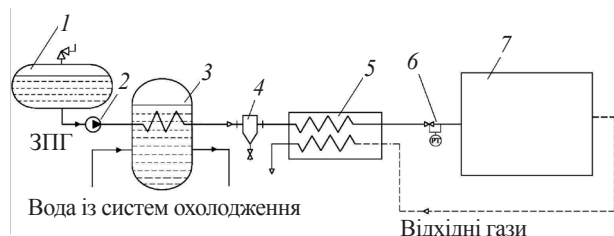


Рис. 5. Принципова схема паливної системи з емнісним регазифікатором-льодогенератором: 1 — цистерни зберігання ЗПГ; 2 — циркуляційний насос ЗПГ; 3 — регазифікатор-льодогенератор; 4 — віддільник рідкої фази; 5 — кожухотрубний підігрівник ЗПГ; 6 — регулятор тиску; 7 — ГД

$Q$  — кількість теплоти, що передається, Вт;  $t$  — температура,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta t$  — температурний напір,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $r$  — питома теплота кипіння/конденсації, кДж/кг;  $\lambda$  — коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м $\cdot^{\circ}\text{C}$ );  $\omega$  — швидкість, м/с;  $\rho$  — густина, кг/м $^3$ ;  $d$  — діаметр, м;  $\delta$  — товщина, м;  $\mu$  — коефіцієнт динамічної в'язкості, Па $\cdot$ с;  $\alpha$  — коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м $^2\cdot^{\circ}\text{C}$ );  $Pr$  — число Прандтля;  $\nu$  — коефіцієнт кінематичної в'язкості, м $^2$ /с;  $Re$  — число Рейнольдса;  $Nu$  — число Нуссельта;  $k$  — коефіцієнт теплопередачі випарника, Вт/(м $^2\cdot^{\circ}\text{C}$ );  $F$  — площа поверхні нагріву, м $^2$ ;  $q$  — густина теплового потоку, Вт/м $^2$ ; індекси 1, 2 відповідають гарячому (хладону) та холодному (ЗПГ) потокам відповідно; індекси «в», «н» — внутрішній та зовнішній поверхням труби відповідно; індекс «ст» — стінці теплообмінника.

При розробці математичної моделі використовувалися класичні формули тепломасообміну [1].

Вплив тиску зберігання ЗПГ у цистернах на витрату теплоносія (рис. 3) має однаковий характер незалежно від витрати ЗПГ. При збільшенні потужності ГД спостерігається зростання масової витрати холодоагенту.

Збільшення тиску зберігання ЗПГ від 0,1 до 0,4 МПа викликає зменшення витрати теплоносія на 8...9%. У розглянутому діапазоні тиску зберігання (0,1...1,2 МПа) витрата теплоносія зменшилася на 20...22% за рахунок зміни значень теплофізичних характеристик ЗПГ. Таке зниження витрати теплоносія приводить до відповідного зменшення його вартості.

Аналіз залежності площі поверхні нагріву від тиску зберігання ЗПГ у цистернах (рис. 4.) при зміні витрати ЗПГ підтвердив однаковий характер апроксимуючої кривої незалежно від потужності двигуна. Площа поверхні нагріву зменшилася на 17% при збільшенні тиску зберігання ЗПГ від 0,1 до 1,2 МПа. Криві мають нерівномірний характер. Стрімке зменшення площі поверхні (на 13...14%), а отже, масогабаритних показників регазифікатора загалом спостерігається лише в інтервалі 0,1...0,5 МПа. Подальше підвищення тиску практично не впливає на характеристики випарника, але суттєво ускладнює систему зберігання палива та вимагає особливих пристроїв для підтримання такого тиску в цистернах ЗПГ.

У паливній системі з емнісним регазифікатором-льодогенератором (рис. 5) регазифікатор складається з водяної ванни та активної поверхні у вигляді змійовика. Зріджений природний газ кипить у трубах, занурених у водяну ванну — джерело теплоти. Процес регазифікації супроводжується утворенням шарів льоду, товщина яких змінюється з часом. Видалення льоду з поверхні здійснюється відтаванням за допомогою циркуляції води в контурі чи механічно-вакуумно-плівковою технологією [6].

Рівняння теплового балансу регазифікатора на робочому режимі має вигляд  $Q_w + Q_{ф.п} = Q_n$ ;  $Q_n = Q_0$ ,

де  $Q_w$  — теплота від гарячого потоку (води), кВт;  $Q_{ф.п}$  — теплота фазового переходу вода-лід, кВт;  $Q_п$  — теплота до поверхні через шар льоду, кВт;  $Q_0$  — теплота до киплячого ЗПГ, кВт.

Додатковим параметром аналізу виступає час, протягом якого відбувається утворення шарів льоду. Дослідження проводилися в діапазоні до 100 хв від початку процесу регазифікації (з кроком у 20 хв).

Отримані результати наведені у вигляді графічних залежностей (рис. 6–8).

Збільшення тиску ЗПГ призводить до зменшення шару льоду на 20...21%. Отже утворюється менший об'єм льоду за один і той самий час (див. рис. 6).

Площа нагріву поверхні регазифікатора-льодогенератора збільшується протягом часу, що пов'язано зі збільшенням питомого об'єму природного газу (див. рис. 7). Характер кривих однаковий для різних моделей дизельних двигунів. При збільшенні потужності двигуна у 8 разів від найменшого до найбільшого значення (2100...17100 кВт) спостерігається майже пропорційне збільшення площі нагріву приблизно у 7,5...8,0 разів. Можна зробити висновок про необхідне обмеження потужності двигунів при використанні регазифікатора-льодогенератора, враховуючи значні габарити теплообмінника.

Вплив зміни умов зберігання на площу нагріву розглядався на прикладі двигуна 18V50DF (див. рис. 8). Установлено, що збільшення тиску ЗПГ призводить до зменшення площі нагріву на 15...17%. Повертаючись до результатів аналізу залежностей товщини шару намороженого льоду від часу процесу, можна зробити такий висновок: отримання раціональних параметрів зберігання ЗПГ потребує більш детальних розрахунків з оптимізації теплообмінника.

**ВИСНОВКИ**

1. На основі створених математичних моделей процесів паливопідготовки ЗПГ визначено зміни принципових характеристик паливних систем. Отримані залежності можуть бути застосовані при проектуванні паливних систем СЕУ на судах, непризначених для перевезення ЗПГ.

2. Регазифікатор типу «труба в трубі» з легкокиплячим теплоносієм має менші масогабаритні показники, ніж регазифікатор-льодогенератор за однакових умов зберігання ЗПГ, його робота не змінюється із часом та не вимагає особливих пристроїв для очищення труб у процесі роботи. Такі теплообмінні апарати добре адаптовані до процесів рекуперації холоду ЗПГ.

3. Використання регазифікатора-льодогенератора забезпечує утилізацію теплоти нагрітої води із системи охолодження дизельних двигунів. Установлення такого регазифікатора на риболовецьких траулерах, що застосовують лід для зберігання риби, дає можливість відмовитися від використання інших льодогенераторів. Застосування такого типу теплообмінника доцільне для двигунів малих та середніх потужностей.

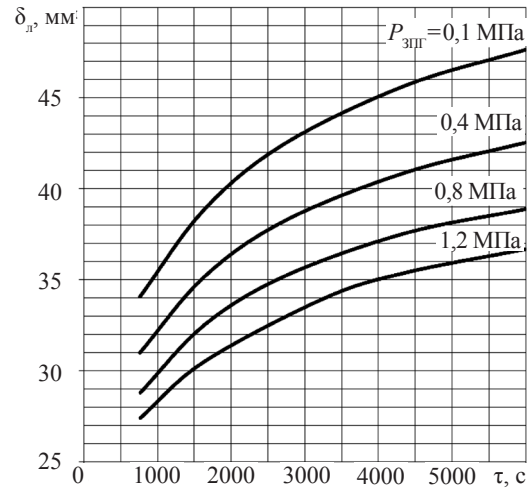


Рис. 6. Залежність товщини шару  $\delta_л$  намороженого льоду в регазифікаторі-льодогенераторі від часу процесу регазифікації  $\tau$  та тиску зберігання ЗПГ

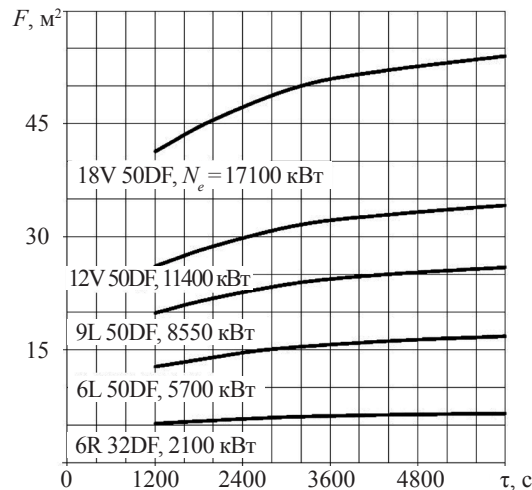


Рис. 7. Залежність розрахункової площі нагріву поверхні  $F$  регазифікатора-льодогенератора від часу процесу теплообміну для різних моделей двигунів

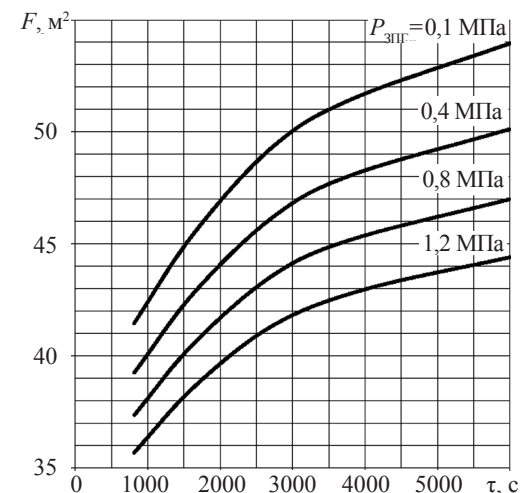


Рис. 8. Залежність розрахункової площі нагріву поверхні регазифікатора-льодогенератора від часу процесу теплообміну для двигуна 18V50DF при змінному тиску зберігання ЗПГ у цистернах

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Алексеев, В. П.** Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок [Текст] / В. П. Алексеев, Г. Е. Вайнштейн, П. В. Герасимов. — Л. : Энергоатомиздат, 1987. — 277 с.
- [2] Альтернативные хладагенты для холодильного транспорта [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.allchemi.com/ru>.
- [3] **Бабакин, Б. С.** Альтернативные хладагенты и сервис холодильных систем на их основе [Текст] / Б. С. Бабакин, В. И. Стефанчук, Е. Е. Ковтунов. — М. : Колос, 2000. — 160 с.
- [4] **Горбов, В. М.** Особенности топливных систем СЭУ на природном газе [Текст] / В. М. Горбов, В. С. Митенкова // Авиационно-космическая техника и технология. — 2008. — № 7 (54). — С. 20–24.
- [5] **Лавренченко, Г. К.** Анализ проблем производства и использования КПП и СПГ [Текст] / Г. К. Лавренченко // Технические газы. — 2008. — № 4. — С. 6.
- [6] Энциклопедия газовой промышленности [Текст] : [пер. с фр.] / под ред. К. С. Басниева. — 3-е изд. — М. : ТВАНТ, 1994. — 884 с.
- [7] **Berisa, M.** New cruise ship concept from Wartsila [Text] / M. Berisa // Twentyfour7. — 2007. — nr 2. — P. 51–54.
- [8] Hybrid coast guard vessel can also burn LNG [Text] // Warship technology. — 2009. — October. — P. 18–21.
- [9] Keeping up to speed with LNG technology [Text] // Offshore Marine Technology. — 2011. — nr 2. — P. 14.
- [10] **Levander, O.** Turning the page in ship propulsion, by switching to LNG [Electronic resource] / O. Levander // Gas as fuel for propulsion of ships — status and perspectives. — Copenhagen, 2008. — Mode of access: <http://www.dieselduck.ca>.
- [11] **Osberg, T. G.** Gas engine propulsion in ships. Safety Considerations [Electronic resource] / T. G. Osberg // Det Norske Veritas AS. — Mode of access: <http://www.bi.edu>.

---

© В. М. Горбов, В. С. Митенкова, К. В. Слюсаренко

Надійшла до редколегії 27.04.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК  
д-р техн. наук, проф. *М. І. Радченко*

Статтю розміщено у Віснику НУК № 3, 2012