

Інформаційне забезпечення оптимізації лічильників газу турбінного класу

© **І.В.Коробко**
д-р техн. наук
i.korobko@kpi.ua
Я.І.Могирьов
В.В.Кротевіч
НТУУ «КПІ»

УДК 681.121

У роботі розглянуто питання побудови програмного комплексу розрахунків та дослідження широко застосовуваних швидкісних перетворювачів витрати рідин і газу з турбінним чутливим елементом. Розроблено спеціальне програмне забезпечення, що дає змогу проводити математичне моделювання приладів. Особливу увагу приділено дослідженню впливу гідродинамічних показників потоку на метрологічні характеристики приладу, оцінці статичної та динамічної характеристик і похибок вимірювання.

Ключові слова: витрата, вимірювання витрати, турбінні вимірювальні перетворювачі, моделювання.

В работе рассматриваются вопросы построения программного комплекса расчетов и исследования широко применяемых скоростных преобразователей расхода жидкостей и газа с турбинным чувствительным элементом. Разработано специальное программное обеспечение, позволяющее проводить математическое моделирование приборов. Особое внимание уделено исследованию влияния гидродинамических показателей потока на метрологические характеристики прибора, оценке статической и динамической характеристик и погрешностей измерения.

Ключевые слова: расход, измерения расхода, турбинные измерительные преобразователи, оптимизация конструкции.

The paper deals with the problems of creation of a software complex for calculations and research of commonly used high-speed transducers of liquids and gas flow rate with the sensing turbine element. Special software is developed in order to provide the mathematical modelling of devices. Special attention is paid to research of the influence of hydrodynamic factors of the flow on metrological characteristics of the device, to the estimation of the static and dynamic characteristics and measurement errors.

Key words: flow rate, flow rate measuring, turbine measuring transducers, modelling.

На сьогодні надзвичайно важливим завданням, що постає перед суспільством, є жорстка економія плинних енергоносіїв, їх точне та надійне обліковування. Як показує досвід реєстрації витрати та кількості природного газу, підвищення точності вимірювань на практиці – актуальна галузева проблема. Важливою також є побудова такої системи проектування вимірювальних перетворювачів витрати, які б забезпечували умови комплексного розв'язання проблеми створення досконалих сучасних вимірювальних засобів із високими метрологічними показниками [1–4].

Для визначення кількісних показників газових потоків широкого застосування набули швидкісні вимірювальні перетворювачі витрати турбінного класу (ТВПВ) завдяки поєднанню їхньої високої точності і надійності із простотою та дешевизною конструкції [1, 5].

Розв'язання задач створення сучасних ТВПВ можливе шляхом проведення великої кількості натурних та напівнатурних досліджень. У той же час сучасний розвиток інформаційних технологій дає змогу з високою ефективністю досліджувати прилади шляхом

комп'ютерного моделювання взаємодії потоку вимірюваного середовища із елементами конструкції перетворювача за розробленими математичними моделями. На основі таких моделей можна реалізувати систему проектування засобів вимірювання із оптимальними параметрами елементів приладу за розробленими критеріями та враховуючи умови експлуатації.

Вихідною вимірювальною інформацією ТВПВ аксіального типу є частота обертання чутливого елемента (ЧЕ), який являє собою гвинтоподібну турбіну.

Основною аналітичною залежністю, що описує роботу ТВПВ, є диференціальне рівняння обертального руху ЧЕ у формі турбіни, яке пов'язує вихідну величину з об'ємною витратою рідини.

$$2\pi J \frac{dn}{dt} = M_p - M_d - M_{\text{ц}} - M_3 - M_{\text{ж}} - M_{\text{п}} - M_{\text{ВП}}, \quad (1)$$

де n – частота обертання ЧЕ; J – момент інерції ЧЕ; M_p – рушійний момент від потоку вимірюваного середовища; M_d – момент тертя об дискову частину турбіни; $M_{\text{ц}}$ – момент тертя о циліндричну частину турбіни;

M_3 – моменти опору, що виникають в радіальному зазорі між турбіною та внутрішньою поверхнею корпусу витратоміра; $M_{\text{ж}}$ – моменти сил в'язкого тертя рідини об поверхню лопатей у міжлопатевих каналах турбіни; $M_{\text{п}}$ – момент сил тертя в опорах турбіни; $M_{\text{вп}}$ – момент реакції вторинного перетворювача.

Вираз (1) після визначення його складових елементів та урахування дії на ЧЕ розвинутого турбулентного режиму течії вимірюваного середовища набуває вигляду [1]:

$$\begin{aligned}
 & 2\pi \left(\frac{1}{2} \pi \rho_{\text{T}} r_{\text{BT}}^4 s + z \rho_{\text{T}} (r_{\text{H}} - r_{\text{BT}}) h l_{\text{л}} \left(\frac{r_{\text{H}} + r_{\text{BT}}}{2} \right)^2 + \right. \\
 & \quad \left. + z \left(\frac{1}{12} \left[(r_{\text{H}} - r_{\text{BT}})^2 + l_{\text{л}}^2 \right] \sin^2 \beta + \right. \right. \\
 & \quad \left. \left. + (h^2 + (r_{\text{H}} - r_{\text{BT}})^2) \cos^2 \beta \right) \rho_{\text{T}} (r_{\text{H}} - r_{\text{BT}}) h l_{\text{л}} + \right. \\
 & \left. + z \left(\mu_{\text{z}} \rho_{\text{п}} \frac{l_{\text{л}} h^4}{48} + \left(\frac{r_{\text{H}} + r_{\text{BT}}}{2} \right)^2 \rho_{\text{п}} (r_{\text{H}} - r_{\text{BT}}) h l_{\text{л}} \right) \right) \frac{dn}{dt} = \\
 & = a \int_{r_{\text{BT}}}^{r_{\text{м}}} \left[v_{\text{ср}} k \left[1 - \left(\frac{r_{\text{м}} - r}{r_{\text{м}} - r_{\text{BT}}} \right)^m \right] k_1 \text{tg} \beta - 2\pi n r \right]^2 dr - \\
 & \quad - 15,2394 \int_0^{r_{\text{BT}}} (\rho_{\text{п}} v^{0,5}) r^3 n^{1,5} dr - \\
 & \quad - a \int_{r_{\text{м}}}^{r_{\text{H}}} \left[v_{\text{ср}} k \left[1 - \left(\frac{r - r_{\text{м}}}{r_{\text{к}} - r_{\text{м}}} \right)^m \right] k_1 \text{tg} \beta - 2\pi n r \right]^2 dr - \\
 & \quad - \int_0^{2\pi} \int_0^s \frac{v_{\text{ср}}^2 \lambda \rho_{\text{п}}}{8} r_{\text{BT}}^2 d\psi dl - \frac{4\pi \mu_{\text{ш}} h z r_{\text{H}} r_{\text{к}}^2}{\sin \beta_{\text{H}} V_0 (r_{\text{к}}^2 - r_{\text{H}}^2)} Q - \\
 & \quad - C_{\text{x}} \rho_{\text{п}} v_{\text{ср}}^2 l_{\text{л}} (r_{\text{H}} - r_{\text{BT}}) r_{\text{ср}} z \cos \beta - \frac{4}{\pi} \mu_{\text{тп}} F_r \frac{d}{2} + \\
 & \quad + \sqrt{\left(0,1651875 \pi \mu_{\text{тп}} F_a^3 \sqrt{F_a \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \right) R} \right)^2 + \left(\frac{4}{\pi} \mu_{\text{тп}} F_r \frac{d}{2} \right)^2},
 \end{aligned} \tag{2}$$

де ρ_{T} – густина матеріалу турбіни; $\rho_{\text{п}}$ – густина вимірюваного середовища; z – кількість лопатей; $\beta_{\text{вих}}$ – кут між абсолютною та відносною швидкостями; λ – коефіцієнт гідравлічного тертя; β_{H} – кут установлення лопатей на зовнішньому радіусі турбіни; $\mu_{\text{тп}}$ – коефіцієнт тертя матеріалів опори; μ_{z} – коефіцієнт приєднаної маси прямокутного перерізу; ζ – поправочний коефіцієнт; h – товщина лопаті; $l_{\text{л}}$ – довжина лопаті вздовж осі обертання турбіни; r_{H} – радіус зовнішньої поверхні лопатей; r_{BT} – радіус поверхні втулки; β – кут встановлення лопатей на середньому радіусі; s – осьова довжина профілю лопаті; $v_{\text{ср}}$ – середня швидкість потоку; m – показник ступеня розподілу швидкості потоку; k – коефіцієнт нерівномірності розподілу швидкості течії за живим перерізом; k_1 – коефіцієнт розбіжності напрямку вектора швидкості потоку за відносного руху з нахилом лопаті до осі ЧЕ; r – радіус прикладання сили; v – кінематичний коефіцієнт в'язкості; $r_{\text{м}}$ – радіус, що

відповідає максимальному значенню швидкостей; ψ – кут інтегрування під час визначення дотичного напруження; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості; $r_{\text{к}}$ – радіус внутрішньої поверхні вимірювальної камери; β_{H} – кут встановлення лопатей на зовнішньому радіусі турбіни; V_0 – об'єм міжлопатєвого простору на довжині, що дорівнює гвинтовому кроку; Q – витрата вимірювального середовища; C_{x} – коефіцієнт лобового опору; $\mu_{\text{тп}}$ – коефіцієнт тертя ковзання; E_r – радіальне зусилля; d – діаметр опори; F_a – осьове зусилля; R – радіус опори (сферичної п'яти); E_1 – модуль пружності матеріалу цапфи; E_2 – модуль пружності матеріалу під'ятника.

$$r_{\text{м}} = \sqrt{\frac{r_{\text{BT}}^2 - r_{\text{к}}^2}{2 \ln \left(\frac{r_{\text{BT}}}{r_{\text{к}}} \right)}}; a = \frac{\rho_{\text{п}} r_{\text{м}} l_{\text{л}}}{2} z.$$

Головною метою оптимізації є створення засобу вимірювання з досконалими метрологічними та експлуатаційними характеристиками шляхом пошуку раціональних значень його внутрішніх параметрів, що забезпечують екстремум цільової функції. Для оптимізації перетворювачів витрати рідини необхідно: визначитися з критеріями оптимізації, цільовою функцією, що відображає роботу досліджуваного перетворювача, найбільш впливовими проектними параметрами цієї цільової функції, обмеженнями, в яких можуть змінюватися проектні параметри, тобто визначити початкові та граничні умови; вибрати метод оптимізації; побудувати алгоритм; розробити програмне забезпечення; здійснити оптимізаційні розрахунки [1–4, 6–9].

Серед великої кількості критеріїв оптимальності вимірювальних приладів, що визначають ефективність їх функціонування, є такі, кількісне значення котрих бажано максимізувати (надійність роботи, діапазон вимірювання витрати, швидкодія, повторюваність вимірювання тощо), та такі, котрі потрібно мінімізувати (похибка вимірювання, вплив на вимірюваний потік і на систему вимірювання природного газу загалом, вартість приладу та його експлуатації). Для практичної реалізації оптимізаційних розрахунків як цільову функцію можна застосувати вираз, що окреслює мінімальне значення відносної похибки визначення частоти обертання ЧЕ Δn_{Cl} [1].

$$\Delta n_{\text{Cl}} = \sum_{i=1}^n 100 \left(\frac{n_{\text{ил } i}(Q_i) - n_{\text{р}}(Q_i, r_{\text{H}0}, r_{\text{ВТ}0}, \beta_0, h_0, l_{\text{л}0}, z_0)}{n_{\text{ил } i}(Q_i)} \right) P_i,$$

де P_i – ваговий коефіцієнт, що є відносним об'ємом рідини, виміряним за i -тої витрати (Q_i); $r_{\text{H}0}$, $r_{\text{ВТ}0}$, β_0 , h_0 , $l_{\text{л}0}$, z_0 – початкові значення проектних параметрів.

Проектними параметрами є незалежні невідомі змінні, які повністю та однозначно визначають розв'язувану задачу проектування та обчислюються в процесі оптимізації.

Проектними параметрами для ТПВ слугують геометричні характеристики вимірювальної камери, що суттєво впливають на його метрологічні характеристики та на роботу загалом.

До таких геометричних параметрів перетворювача витрати відносять: товщину профілю лопатей h ;

радіальний зазор $r_k - r_n$; втулке відношення $(r_{вт}/r_n)$; кількість лопатей z ; кут встановлення лопатей β ; осьову довжину турбіни s .

Для практичної реалізації поставленого завдання актуальним є розроблення програмного забезпечення, спроможного здійснювати оптимізаційні розрахунки ТВПВ природного газу за окресленими критеріями та параметрами впливу на метрологічні характеристики приладів і вказувати шляхи їх покращення.

Програмний комплекс оптимізаційних розрахунків

Програмне забезпечення обчислювального комплексу оптимізаційних досліджень засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати за різних режимів експлуатації й умов застосування розроблено на підґрунті математичної моделі (2), що описує взаємодію потоку вимірюваного середовища з елементами конструкції перетворювача витрати і є логічним наповненням програмного комплексу розрахунків і дослідження турбінних вимірювальних перетворювачів витрати рідини і газу.

Обчислювальний комплекс оптимізації та дослідження швидкісних вимірювальних перетворювачів турбінного класу побудовано із використанням сучасних програмних технологій *NET Framework*, *Visual Studio ma C# (C Sharp)*.

У ході розроблення програмного забезпечення оптимізаційних розрахунків засобів вимірювання витрати природного газу використовують інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, який є зручним і не викликає ускладнень під час опанування повного циклу роботи з програмою.

Після запуску додатку на екрані з'являється головна форма, у якій безпосередньо виконується вибір режиму оптимізації й відображається форма введення допустимих значень оптимізаційних проектних параметрів елементів конструкції й умов використання приладу (рис. 1). Для частини параметрів вимірювано-

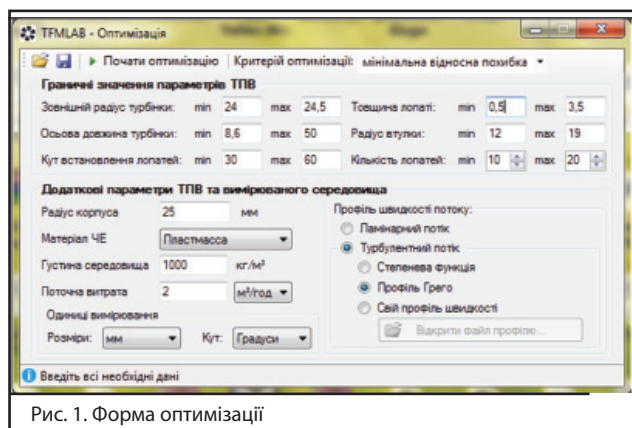


Рис. 1. Форма оптимізації

го середовища, умов вимірювання та елементів конструкції перетворювача вводимо їхні реальні значення.

Обмеження числових значень проектних оптимізаційних параметрів, що задає користувач, визначають на основі умов застосування приладу для розв'язання конкретної задачі чи комплексу задач із урахуванням конструктивних особливостей приладу.

У разі виходу за допустимі межі або введення інших некоректних даних з'являється діалогове вікно з повідомленням про помилку (рис. 2).

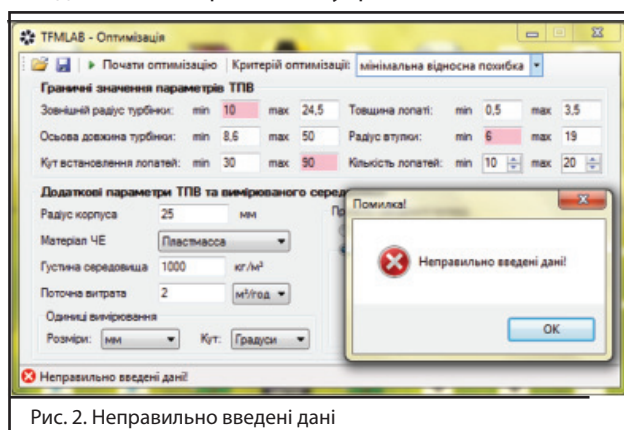


Рис. 2. Неправильно введені дані

Після спроби почати оптимізацію з наявними незаповненими полями вводу аналогічно з режимом дослідження з'являється діалогове вікно із повідомленням про необхідність ввести всі необхідні дані (рис. 3).

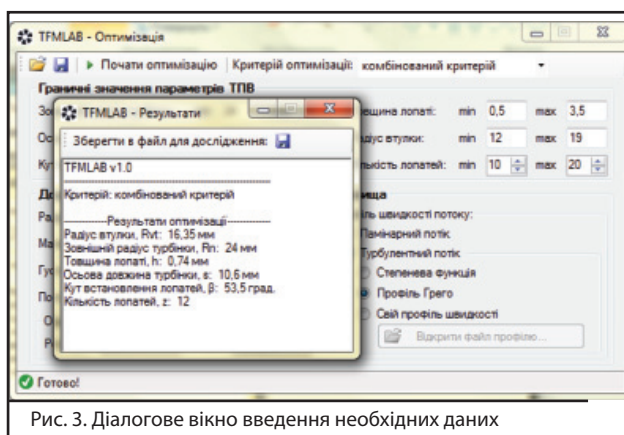


Рис. 3. Діалогове вікно введення необхідних даних

У режимі оптимізації реалізовано можливість зберегти і відкривати файли, що містять введені параметри.

Після введення всіх коректних даних натискаємо кнопку «Почати оптимізацію» – і з'являється вікно результатів (рис. 4), у якому є текстовий бокс із резуль-

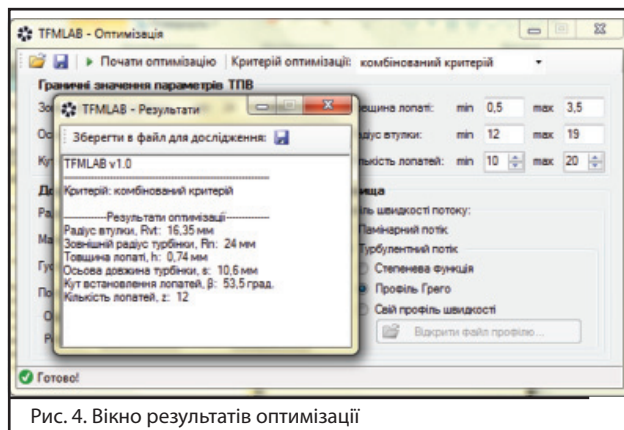


Рис. 4. Вікно результатів оптимізації

татами оптимізації та кнопка збереження результатів оптимізації. Кнопка збереження результатів оптимізації зберігає значення конструкційних параметрів перетворювача у файл дослідження для подальшого його відкриття у режимі дослідження.

Дослідження впливу неоднорідностей газових потоків з огляду на складність та трудомісткість процесів

натурних досліджень, на точність турбінних перетворювачів витрати проводили із застосуванням методів обчислювальної гідрогазодинаміки на базі програмного комплексу ANSYS CFX.

Висновки

Розроблений програмний комплекс забезпечує проведення оптимізаційних розрахунків і дає можливість досліджувати метрологічні характеристики швидкісних вимірювальних перетворювачів витрати природного газу турбінного класу різних типорозмірів і в широкому діапазоні умов їх застосування. Це дає можливість аналізувати метрологічні характеристики засобів вимірювальної техніки ще на етапі їх проекту-

вання й оцінювати вплив на них параметрів елементів конструкції і реальних умов застосування. Отримані результати сприятимуть вдосконаленню приладів вимірювання витрати і кількості рідини і газу, що сприяє підвищенню точності їх обліку.

Розглянуті питання оптимізації за визначеними критеріями дають можливість віднайти такі геометричні характеристики елементів конструкції приладів, за яких досягається максимальна певність та надійність вимірювання.

Подальші дослідження направлені на розроблення програмного комплексу оптимізації ультразвукових вимірювальних перетворювачів витрати рідини і газів за визначеними критеріями.

Список використаних джерел

1. **Писарець А.В.** Турбінні перетворювачі витрати енергоносіїв з гідродинамічним врівноважуванням чутливого елемента [Текст]: моногр. / А.В. Писарець, І.В. Коробко. – К.: Корнійчук, 2013. – 160 с.
2. **Коробко І.В.** Визначення критеріїв оптимізації та проектних параметрів турбінних перетворювачів витрат [Текст] / І.В. Коробко, А.В. Писарець // Вісн. ЖДТУ. Технічні науки. – 2006. – № 2 (37). – С. 99–104.
3. **Гришанова І.А.** Оптимізація конструктивних параметрів засобів вимірювання витрат енергоносіїв [Текст] / І.А. Гришанова // Вісн. Черкас. інж.-технолог. ін-ту: сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение-2001». – Вінниця, 2001. – С. 57–61.
4. **Коробко І.В.** Оцінка ефективності вимірювальних перетворювачів витрати рідин і газів [Текст] / І.В. Коробко // Вісн. НТУУ «КПІ». – 2012. – Вип. 44. – С. 111–117. – (Сер. Приладобудування).
5. **Кремлевский П.П.** Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник [Текст] / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 701 с.
6. **Реклейтис Г.** Оптимизация в технике [Текст]: пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – Т. 2. – 320 с.
7. **Реклейтис Г.** Оптимизация в технике [Текст]: пер. с англ. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – Т. 1. – 350 с.
8. **Аоки М.** Введение в методы оптимизации [Текст]: пер. с англ. / М. Аоки. – М.: Наука, 1977. – 344 с.
9. **Коробко І.В.** Програмний комплекс розрахунків і дослідження турбінних вимірювальних перетворювачів витрати рідини та газу [Текст] / І.В. Коробко, Я.І. Могирьов, В.В. Кротевич // Вісн. НТУУ «КПІ». – 2015. – Вип. 74. – С. 111–117. – (Сер. Машинобудування).

Нові правила забезпечення країн ЄС природним газом

Європейська Комісія підготувала нові пропозиції щодо заходів, які стосуються попередження газових криз і кращої координації між країнами Євросоюзу. Пропозиції змінять так звані міжурядові угоди в сфері енергетики між країнами, які є членами і не є членами ЄС, і запровадять стратегію для підвищення енергетичної безпеки шляхом доступу до ЗПГ і підземних газових сховищ. Ці пропозиції є частиною енергетичної стратегії ЄС і, як ідеться в заяві Єврокомісії, «дадуть сильний поштовх для поліпшення енергетичної безпеки і солідарності Євросоюзу». Вони також кореспондують з заявами Євросоюзу щодо шляхів боротьби зі зміною клімату, схвалених на Паризькому кліматичному саміті в кінці минулого року.

Для попередження газової кризи Комісія планує поліпшити координацію між країнами-членами ЄС і розробити правила, які будуть вимагати від країни-члена ЄС допомагати сусідній країні, якщо остання перебуває у кризовій ситуації. Відповідно до так званого принципу солідарності країна ЄС, що опинилася в небезпеці, може розраховувати на газопостачання своїх домогосподарств з відповідним сервісом, яке буде гарантоване з боку сусідніх країн ЄС.

На сьогодні природний газ покриває четверту частину потреб енергії Євросоюзу, котрий є найбільшим його імпортером у світі. Очікуване падіння власного видобутку газу впливатиме також і на обсяги його імпорту. Крім того, газ відіграє визначальну роль у супроводі переходу ЄС на низьковуглецеву енергетичну систему, оскільки він є дублюючим паливом для відновлюваної енергії, коли виробництво останньої утруднюють погодні умови.

Комісія також запропонувала підсилити так звані міжурядові енергетичні угоди між членами і не членами ЄС. Нові правила дадуть змогу вживати відповідні заходи перед підписанням таких угод, якщо, за оцінками, вони можуть негативно впливати на безпеку газопостачання іншої країни ЄС або затрудняти функціонування енергетичного ринку Євросоюзу.

Комісія окреслила також основні напрями щодо поліпшення доступу до глобального ринку ЗПГ, який швидко розвивається, і кращого використання газових сховищ усього ЄС, що дасть можливість країнам Євросоюзу, залежним від газових постачальників, диверсифікувати газопостачання, а отже, зміцнити свою енергетичну безпеку.

ЄС має великі можливості щодо поліпшення енергетичної безпеки і конкурентоспроможності завдяки позитивному розвитку глобального ринку ЗПГ. Упевненість у тому, що всі члени ЄС мають доступ до ринку зрідженого природного газу і диверсифікованих джерел постачання, є ключовою метою енергетичної стратегії ЄС. Сумарна потужність Європи з приймання ЗПГ є досить великою – зараз (на рівні 2015 р.) вона достатня для покриття близько 43 % поточних сумарних потреб. Однак істотні регіональні диспропорції щодо доступу до ЗПГ залишаються. Комісія запропонувала стратегію, яка поліпшить доступ усіх членів Євросоюзу до ЗПГ як альтернативного джерела газу. Центральними елементами цієї стратегії є спорудження стратегічної інфраструктури для формування міжнародного енергетичного ринку і визначення необхідних проектів, які покладуть кінець залежності деяких членів ЄС від одного джерела постачання.

За матеріалами http://www.lngworldnews.com/eu-proposes-new-gas-and-lng-rules/?utm_source=ema...