

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.59 (075.8)

Аналіз можливостей удосконалення газифікаційних азотних установок високого тиску для колтюрінгових технологій

Г. К. Лавренченко¹✉, І. В. Кириченко², О. В. Воробйов³, О. М. Тімков⁴

¹ТОВ «Інститут низькотемпературних енерготехнологій», а/с 188, Одеса, 65026, Україна;

²⁻⁴Виробничо-комерційна фірма «Кріопром» ТОВ, а/с 99, Одеса-26, Україна, 65026

✉ e-mail: ¹lavrenchenko.g.k@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-8239-7587>

У зв'язку із зростанням в Україні видобутку природного газу зростає інтерес до застосування колтюрінгових технологій. Для їх реалізації потрібне спеціальне обладнання. Складовою та важливою частиною колтюрінгової установки є газифікаційна азотна установка високого тиску. У таких установках, що не поступаються показникам аналогічного зарубіжного обладнання, зацікавлені державні газовидобувні компанії. Спроектвана газифікаційна азотна установка ГУ-600/45 підтверджує вказаний висновок. Технічне завдання мало на меті створення транспортельних установок із відносно невисокою продуктивністю (600 м³/год) по азоту та з кінцевим його тиском не вище 450 кгс/см². Потреба у ГУ-600/45 обумовлена наявністю у Полтавській та Харківській областях великої кількості свердловин із глибиною 2...3 км. У створених установках виробником використані перспективні рішення. Наприклад, у схемі ГУ застосовують відцентровий маловитратний насос компанії «Cryostar» для переохолодження рідкого азоту перед подачею в поршневий насос. При заводських випробуваннях установок було наголошено на необхідності теплоізоляції рідинних трубопроводів, що зв'язують кріогенну ємність і відцентровий насос. Для ізолювання трубопроводів використовували високоякісну ізоляцію типу «Cryogel» компанії «Lydall». Фахівці Кріопрому розробили та виготовили власну запірну та запобіжну арматуру високого тиску з $P_y = 500$, яка успішно пройшла перевірку при випробуваннях установок. Компанією «Кріопром» розроблено також нову більш досконалу газифікаційну азотну установку ГУ-1200/45. У ній передбачено зниження питомого енергоспоживання; усунення вібрації під час роботи дизель-генератора; збільшення продуктивності газоподібного азоту та ін. Складові частини нової установки змонтовані в двох 20-футових контейнерах. В установці застосовують атмосферні випарники, які знижують споживання електроенергії майже вдвічі. Установка комплектується блоком із шести атмосферних випарників. З'єднання двох контейнерів для спільної роботи з азотом здійснюється гнучкими кріогенними шлангами з швидкороз'ємними з'єднаннями.

Ключові слова: Колтюрінг; Газифікаційні азотні установки; Газоподібний азот високого тиску; Контейнерне виконання; Трилінійний поршневий насос; Атмосферні випарники; Рідкий азот

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v59i4.2810>

© The Author(s) 2023. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. Вступ

Одним із основних напрямів забезпечення енергетичної незалежності України є збільшення власного видобутку природного газу. Досягнення енерго-

незалежності неможливе без використання новітніх наукомістких технологій, які дозволяють продовжити життєвий цикл родовищ шляхом їхньої інтенсифікації з прийнятними витратами.

Останні три роки спостерігається підвищення

темтів зростання видобутку газу. Так, у 2018 р. в Україні було вилучено 20,9 млрд. м³ природного газу всіма газодобувними компаніями. Із цього обсягу 75% припадає на найбільшу державну газодобувну компанію АТ «Укргазвидобування».

Зростання цін на природний газ в Україні на тлі зменшення податкового навантаження дозволило газодобувним компаніям акумулювати значні кошти, частина з яких пішла на інвестиції в геологорозвідку, буріння, видобуток та розвиток нафтогазової інфраструктури.

Такого обсягу інвестицій, як у 2018-ому, вітчизняна газодобувна галузь ще не мала. Основна ніша ринку припадала на компанію «Укргазвидобування», яка збільшила інвестиції у виробництво з 12 млрд. грн. 2017 р. до 28 – у 2018 р.

Ця компанія першою в Україні почала застосовувати сучасні ефективні колтбінгові технології «гідродинамічних розривів» при видобутку природного газу.

Для реалізації зазначеної технології має використовуватися спеціальна установка, призначена для проведення технологічних операцій при підземному ремонті свердловин, а також для буріння бічних, похилих та горизонтальних стволів у нафтових та газових свердловинах із застосуванням гнучких труб. Колтбінг – це найдешевша і найсучасніша технологія буріння газових свердловин. Суть її полягає в тому, що замість звичайних збірних сталевих бурильних труб усередині свердловин зміцнюються гнучкі, безперервні труби, які можуть вигинатися під землею та працювати в горизонтальних стволах. Ця технологія почала широко використовуватися наприкінці 80-х років минулого століття у провідних газодобувних країнах. Особливо важливо, що тільки цю технологію можна використовувати для відновлення роботи свердловин, які до цього були законсервовані. Аналіз та вивчення матеріалів, підготовлених НАК «Надра України», дозволили вибрати 190 свердловин для їх реліквідації з метою збільшення видобутку вуглеводнів із меншими втратами, ніж потрібні для буріння нових.

Будь-який комплекс колтбінгового видобутку газу складається з трьох складових частин: системи гнучких труб, насосного кислотостійкого агрегату та азотної криогенної установки. Досі всі ці три агрегати закуповувалися виключно за кордоном. Однак наявність в Україні відомого виробника криогенної техніки, – ВКФ «Кріопром» ТОВ, м. Одеса, – дозволило АТ «Укргазвидобування», після аналізу ринку та вивчення технічних можливостей фірми, замови-

ти їй у 2018 р. розробку та виготовлення чотирьох азотних газифікаційних установок.

У статті викладено результати випробувань перших вітчизняних газифікаційних установок для забезпечення газоподібним азотом високого тиску технології колтбінгу. Крім цього повідомляється про розробку більш досконалих та ефективних газифікаційних установок.

2. Газифікаційна установка ГУ-600/45

Колтбінгові азотні газифікаційні установки, що знаходяться в експлуатації в компанії АТ «Укргазвидобування» вироблено компаніями зі США, Канади, Китаю. Їхня продуктивність становить від 1500 м³/год і вище з кінцевим тиском до 700 кгс/см². Перед ВКФ «Кріопром» замовником було поставлено завдання спроектувати та виготовити транспортбельну азотну газифікаційну установку з меншою продуктивністю (600 м³/год) та з меншим кінцевим тиском (450 кгс/см²).

Необхідність створення установок з такими параметрами обумовлена наявністю великої кількості свердловин у Полтавській та Харківській областях із глибиною до 2...3 км. Для освоєння чи реліквідації таких свердловин доцільно мати невеликі газифікаційні азотні установки.

Основні вимоги, що пред'являються АТ «Укргазвидобування» до таких установок:

- мобільність – все обладнання установки повинно розміщуватися на опорній рамі контейнерного типу в габаритах «1 ВВ»;
- автономність – установка повинна комплектуватися дизель-генераторною установкою та забезпечувати всі потреби в електроенергії;
- гарантія отримання плюсової температури газоподібного азоту високого тиску;
- автономність роботи установки без дозаправки рідким азотом протягом 8 годин;
- можливість підключення до основної колтбінгової установки.

Конкретні вимоги до характеристик колтбінгової установки наведено у табл. 1.

При розробці схеми та підборі обладнання враховувалися зазначені вимоги, основною з яких був транспортний габарит установки. В умовах обмежених розмірів майданчика для розміщення обладнання довелося відмовитись від застосування атмосферних випарників та використовувати транспортний горизонтальний резервуар з максимально можливою ємністю 8 м³.

Таблиця 1 – Основні характеристики установки ГУ-600/45

Найменування параметру	Норма
Об'ємна продуктивність по азоту, м ³ /год	600
Максимальний робочий тиск азоту, кгс/см ²	450
Температура газу на виходіустановки, °С	10...20
Місткість криогенногорезервуару, м ³	8
Тип випарника	електричний
Тип теплоносія у випарнику	50% водний розчин етиленгліколю
Транспортний габарит установки (довжина x ширина x висота), мм	9125x2438x2591

Перерахуємо основне обладнання газифікаційної азотної установки ГУ-600/45:

- криогенна горизонтальна транспортна ємність;
- поршневий трилінійний криогенний насос;
- електричний випарник азоту;
- відцентровий криогенний насос;
- щит управління та контролю;
- дизель генератор.

Загальний вид установки та розташування обладнання представлено на рис.2

Для транспортування та зберігання рідкого азоту використовується горизонтальна транспортна ємність з вакуумно-порошковою ізоляцією об'ємом 8 м³, виконана на спеціальне замовлення ВКФ «Кріопром» у Європі. Транспортна ємність забезпечена високопарником підйому тиску, всією необхідною запірною та запобіжною арматурою та засобами контролю параметрів. Характеристики її вказані у табл. 2.

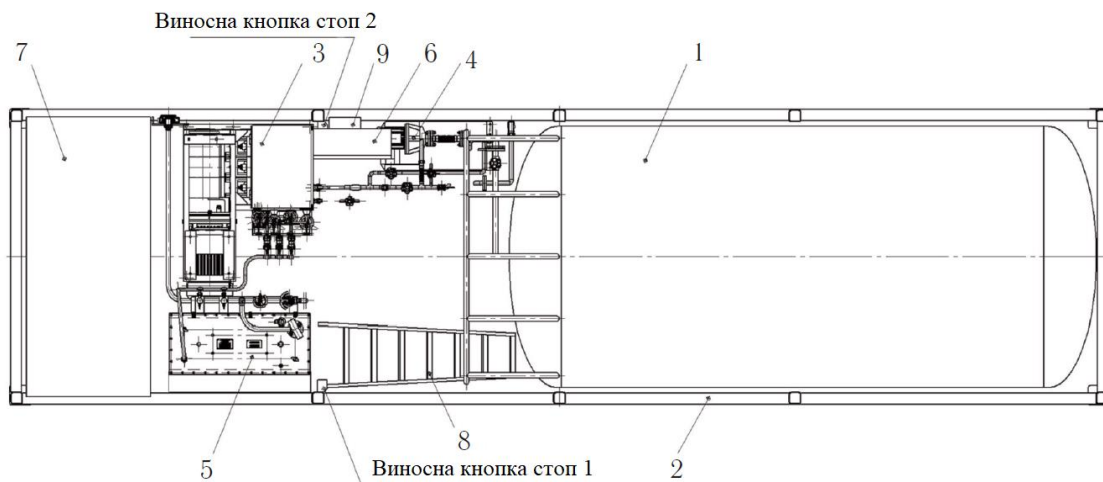
**Рисунок 1** – Види на обладнання, змонтоване на каркасній рамі в габаритах контейнера типу «1 ВВ»

Рисунок 2 – Установка азотна газифікаційна ГУ-600/45: 1 – горизонтальна транспортна ємність К-К8000-8/VP/HD; 2 – рама; 3 – агрегат насосний АК 0420.01.000; 4 – агрегат насосний АК 0420.02.000; 5 – випарник АК 6769.000; 6 – щит управління АК 8622.000; 7 – генераторна установка G140S; 8 – сходи приставні; 9 – блок безперебійного живлення BBGP-123W

Таблиця 2 – Технічні характеристики транспортної криогенної ємності

Найменування параметру	Норма
Геометрична ємність, л (м ³)	8000 (8)
Корисна ємність, л (м ³)	7600 (7,6)
Маса рідкого азоту, що зберігається, кг	6000
Робочий тиск (максим.), бар	8
Добові втрати продукту від випаровування при зберіганні, %/добу	0,3
Маса порожньої ємності, кг	3800
Габаритні розміри, мм:	
- довжина	5500
- зовнішній діаметр	2200

Для створення кінцевого тиску газоподібного азоту установка комплектується «підпірним» відцентровим насосом фірми «Cryostar» (Франція) та основним трилінійним поршневым насосом виробництва ВКФ «Кріопром». Відцентровий насос забезпечує переохолодження рідкого азоту перед подачею його в поршневий насос. При виборі відцентрового насоса враховувалася продуктивність установки (600 м³/год), що є мінімальним значенням для роботи відцентрових насосів. Фірма «Cryostar» виявилася єдиним виробником відцентрових насосів з мінімальним діаметром робочого колеса 120 мм. Інші відомі виробники відцентрових насосів (фірми «ACD CRYO» і «Vanzetti Engineering») за такої заданої нами малої продуктивності не змогли задовольнити нашим умовам. При заводських випробуваннях установки було наголошено на необхідності ізоляції рідких трубопроводів, що зв'язують криогенну ємність та відцентровий насос. Тому було ухвалено рішення ізолювати ці трубопроводи високоякісною низькотемпературною ізоляцією типу «Cryogel» фірми «Lydall».

Необхідний кінцевий тиск газоподібного азоту та продуктивність установки забезпечуються поршневым криогенним насосом НЖ-0,27/45. Поршневий насос виробництва ВКФ «Кріопром» є трилінійним агрегатом (рис. 3) із встановленою потужністю електродвигуна 30 кВт. Регулювання продуктивності від 400 до 700 м³/год здійснюється частотним перетворювачем струму.

Підігрів газоподібного азоту на виході з установки здійснює електричний випарник виробництва ВКФ «Кріопром» (рис. 4). Випарник заповнений 50%-ним водним розчином етиленгліколю, який

нагрівається трубчастими елементами (ТЕН) до 10...20 °С. Вся група ТЕНів розбита на три секції, що дозволяє проводити плавне регулювання температури газоподібного азоту шляхом включення/вимкнення цих секцій.

**Рисунок 3** – Комутація ліній трилінійного поршневого насоса**Рисунок 4** – Випарник та арматура високого тиску виробництва ВКФ «Кріопром»

Важливим елементом при створенні установки ГУ-600/45 був підбір запірної та запобіжної арматури. Якщо на стороні криогенних температур і низького тиску вибір арматури відомої фірми «Herose» був очевидним, то на стороні високого тиску з необхідним умовним тиском 500 кгс/см² підбір арматури був утруднений. Для вирішення цієї проблеми фахівці розробили та виготовили власну запірну та запобіжну арматуру високого тиску з $P_y = 500$, яка успішно пройшла перевірку як при випробуваннях установки ГУ-600/45, так і її експлуатації.

Автономна робота газифікаційної установки в польових умовах забезпечується дизель-генераторною установкою відкритого типу фірми JSB (Вели-

кобританія). Вибір цього типу дизель-генератора обумовлений надійністю обладнання фірми JSB, а його відкрите виконання – відповідність необхідним габаритним розмірам. Основні характеристики дизель-генератора:

- номінальна потужність – 120 кВА;
- маса – 1550 кг;
- габаритні розміри: 2300 x 1030 x 11750 мм;
- ємність паливного бака – 400 л;
- витрата палива (макс.) – 29,6 л/год.



Рисунок 5 – Розташування відцентрового та поршневого насосів в установці ГУ-600/45

Для керування установкою створено загальний щит, який забезпечує живлення всіх споживачів електроенергії від дизель-генератора, захисні блокування насосів та випарника, контроль параметрів від датчиків, встановлених за місцем. Щит виготовлений з нержавіючої сталі у транспортному виконанні зі ступенем захисту IP 54. Місце роботи оператора з автономним освітленням знаходиться на платформі всередині установки та має загальний доступ до щита керування генератором та установкою, пускової запірної арматури. З двох сторін контейнера встановлені кнопки «Стоп», що окремо стоять; натисканням на одну з них можна негайно зупинити роботу газифікаційної установки.

Все технологічне обладнання установки з тру-

бопроводами, арматурою, електричними кабелями, щитом управління, роз'ємами для наповнення криогенної ємності та видачі газоподібного азоту високого тиску розміщується на єдиній рамі каркасного типу з контейнерними кріпленнями в розмірах стандартного 30-ти футового контейнера 1ВВ. Каркасна опорна рама контейнерного типу була виготовлена спеціалізованому контейнерному виробництві. Для захисту обладнання та комунікацій під час перевезення виробу на автомобільній платформі воно комплектується захисними транспортними ролетами. Готову ГУ-600/45 зображено на рис. 6.



Рисунок 6 – Загальний вид установки ГУ-600/45 на транспортному

ВКФ «Кріопром» виготовив для АТ «Укргазвидобування» та здав в експлуатацію на початку 2019 р. чотири газифікаційні установки ГУ-600/45.

3. Перспективні напрямки

Газифікаційна установка ГУ-600/45 була виготовлена під конкретне замовлення компанії АТ «Укргазвидобування». Як показали заводські випробування і досвід експлуатації, що вже накопичився, вона виконує необхідні функції. Однак ця установка має і недоліки, які можна усунути при подальших дослідженнях: підвищене питоме енергоспоживання; наявність додаткової вібрації під час роботи дизель-генератора, який розміщений на одній платформі з установкою; максимально бажана довжина контейнерного майданчика під час розміщення обладнання; невисока продуктивність по газоподібному азоту.

Перспективним є застосування в газифікаційних установках атмосферних випарників, які знижують споживання електроенергії практично вдвічі.

Установки можна виготовляти на базі 20-ти футових контейнерів з розбивкою на два модулі. При збереженні старого варіанта установки можна додати до схеми обладнання для використання теплоти вихлопних газів, які скидаються з дизель-генераторної установки.

ВКФ «Кріопром» ТОВ вже виконала ескізний проект нової газифікаційної установки з збільшеною продуктивністю ГУ-1200/45. Ця газифікаційна установка базується на трилінійному поршневному насосі НЖ-0,5/45. Вона складається з двох складових частин, кожна з яких є 20-футовим контейнером (каркасна рама контейнерного типу), де буде змонтовано все обладнання установки.

У першому контейнері розташовуються транспортна криогенна ємність з геометричним об'ємом 8 м³ та відцентровий насос. У другому контейнері встановлюються трилінійний поршковий насос; блоки атмосферних випарників, електричний «догрівач» газоподібного азоту; щит керування азотною установкою, включаючи частотний перетворювач (для електродвигуна поршневого насоса). З'єднання двох контейнерів для спільної роботи з азотом здійснюється гнучкими криогенними шлангами з швидко-роз'ємними з'єднаннями. Уявлення про характеристики установки дає табл. 3.

Таблиця 3 – Основні характеристики установки ГУ-1200/45

Найменування параметру	Норма
Об'ємна продуктивність по азоту, м ³ /год	800...1400
Максимальний робочий тиск азоту, кгс/см ²	450
Температура газу на виході установки, °С	10...20
Місткість криогенного резервуару, м ³	8
Тип випарника	атмосферний
Кількість модулів	2
Транспортний габарит одного модуля, мм	6058x2438x2596

Для суттєвого зниження встановленої та споживаної електричної потужності азотна установка комплектується блоками атмосферних випарників [1,3].

Конструктивно кожний блок є випарником, виконаним із сколектованих між собою оребрених

двошарових труб типу «зірочка», що обдуваються атмосферним повітрям за допомогою вентиляторів [4]. Зовнішня труба та ребра виконані з алюмінієвого сплаву; внутрішня трубка Ø 16x3 – зі сталі 12X18N10T. Спосіб виготовлення такої двошарової труби запатентовано ВКФ «Кріопром» в Україні [2].

Виходячи з заявленої продуктивності, установка комплектується блоком із шести атмосферних випарників продуктивністю 240 м³/год азоту, що газифікується. Усі випарники паралельно колектуються для подачі рідкого азоту та видачі газоподібного. Температура газоподібного азоту, що виходить, на 20 °С нижче температури навколишнього середовища. Тому на виході з атмосферних випарників у різну пору року будуть підтримуватись різні температури газоподібного азоту. Для отримання однакового паспортного значення температури продуктивного газоподібного азоту до схеми включається електричний двосекційний догрівач, який остаточно підігріває азот до 20 °С.

Виключення дизель-генератора з комплекту установки знижує вібрацію до мінімуму та звільняє місце на майданчику для розміщення атмосферних випарників.

Внаслідок такої розробки виходять два варіанти виконання газифікаційних установок виробництва ВКФ «Кріопром» типу ГУ.

4. Висновки

Подальший ефективний розвиток галузі видобутку нафти та природного газу пов'язаний із кольтюбінговою технологією, для якої необхідні газифікаційні азотні установки високого тиску. Наявність установок різної продуктивності є актуальною не тільки для України, а й для всіх газовидобувних країн. ВКФ «Кріопром» сьогодні вже має досвід створення таких установок та їх експлуатації. Конструкторсько-технологічні та виробничі можливості компанії дозволяють успішно вирішувати питання щодо створення установок різної продуктивності та комплектації їх залежно від умов замовника.

Особистий внесок авторів CRediT

Лавренченко Г.К.: концептуалізація, методологія, формальний аналіз. **Кириченко І.В.:** експериментальні дослідження, аналіз та узагальнення даних. **Воробійов О.В.:** методичне забезпечення, аналіз даних. **Тімков О.М.:** експериментальні дослідження, обробка даних, інформаційний пошук.

Література

1. **Іванов К.А., Павлов Н.В.** Сучасні атмосферні випарники криогенних рідин // Технічні газы. – 2010. – № 3. – С. 30-33.
2. Патент України № 96497 «Спосіб виготовлення біметалічної реберної труби» від 10.02.2015 р.
3. **Таран В.М.** Проектування апаратів криогенних установок: навчальний посібник. – Одеса: ОДАХ, 2007. – 74 с.
4. **Грудка Б.Г., Басов А.М.** Газифікаційні установки: конспект лекцій. – Одеса: ОНАХТ, 2022. – 79 с.

Отримана в редакції 17.10.2023, прийнята до друку 19.12.2023

Analysis of the possibilities of improving high-pressure nitrogen gasification plants for coiled tubing technologies

Georg Lavrenchenko¹✉, Ihor Kirichenko², Oleksii Vorobiev³, Oleh Timkov⁴

¹«Institute of Low Temperature Energy Technology», POB 188, Odesa, 65026, Ukraine;

²⁻⁴PCF«Krioprom» LLC, POB 99, Odesa, 65026, Ukraine

✉ e-mail: ¹lavrenchenko.g.k@gmail.com

ORCID: ¹<http://orcid.org/0000-0002-8239-7587>

In connection with the growth of natural gas production in Ukraine, interest in the application of coiled tubing technologies is growing. Special equipment is required for their implementation. A component and important part of a coiled tubing installation is a high-pressure nitrogen gasification installation. State gas production companies are interested in such installations, which are not inferior to similar foreign equipment. The designed nitrogen gasification plant GU-600/45 confirms this conclusion. The technical task was aimed at creating transportable units with a relatively low nitrogen productivity (600 m³/h) and with a final pressure of no more than 450 kgf/cm². The need for GU-600/45 is due to the availability of a large number of wells with a depth of 2...3 km in the Poltava and Kharkiv regions. In the installations created by the manufacturer, promising solutions were used. For example, in the GU scheme, a low-power centrifugal pump from the Cryostar company is used to subcool liquid nitrogen before feeding it to the piston pump. During the factory tests of the installations, it was emphasized the need for thermal insulation of the liquid pipelines connecting the cryogenic tank and the centrifugal pump. To insulate the pipelines, high-quality insulation of the "Cryogel" type of the company "Lydall" was used. Kryoprom specialists developed and manufactured their own shut-off and safety valves of high pressure with $P_u = 500$, which successfully passed inspection during installation tests. The Kryoprom company also developed a new, more advanced nitrogen gasification unit GU-1200/45. It provides for a decrease in specific energy consumption; elimination of vibration during operation of the diesel generator; increasing the productivity of gaseous nitrogen, etc. The components of the new installation are mounted in two 20-foot containers. Atmospheric evaporators are used in the installation, which reduce electricity consumption by almost half. The installation is equipped with a block of six atmospheric evaporators. The connection of two containers for joint work with nitrogen is carried out by flexible cryogenic hoses with quick-disconnect connections.

Keywords: Coiled tubing; Gasification nitrogen installations; High-pressure nitrogen gas; Container execution; Three-line piston pump; Atmospheric evaporators; Liquid nitrogen

References

1. **Ivanov, K.A., Pavlov, N.V.** (2010) Modern atmospheric evaporators of cryogenic liquids. *Industrial gases*, 3, 30-33.
2. (2015) Patent of Ukraine No. 96497 "Manufacturing method of bimetallic ribbed pipe" dated February 10, 2015.
3. **Taran, V.M.** (2007) Design of apparatus for cryogenic installations: a study guide. *Odesa: OSAR*, 74.
4. **Hrudka, B.H., Basov, A.M.** (2022) Gasification plants: lecture notes. *Odesa: ONAFT*, 79.

Received 17 October 2023
Approved 19 December 2023
Available in Internet 02 January 2024