

**Спеціалізованій вченій раді Д26.224.02
при Інституті технічної теплофізики НАН України
03057, м. Київ, вул. Желябова, 2а**

ВІДГУК

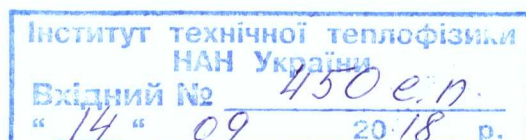
офіційного опонента, кандидата технічних наук, старшого наукового співробітника відділу відновлюваних органічних енергоносіїв Інституту відновлюваної енергетики НАН України Клюса Сергія Володимировича на дисертаційну роботу Зубенка Віталія Ігоровича на тему «Технологія швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу», що представлена на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії.

1. Актуальність теми дисертації

Зростаюча потреба в доступних та надійних енергоресурсах зумовлює вдосконалення технологій виробництва енергії та розвиток систем з виробництва енергії з відновлюваних джерел енергії, зокрема біомаси.

Україна зобов'язалася розширити використання відновлюваних джерел енергії підписанням Протоколу про приєднання до Енергетичного співтовариства. Також, відповідно до «Національного плану з відновлюваної енергетики на період до 2020 року», затвердженого розпорядженням №902-р Кабміну України 1 жовтня 2014 р., у 2020 році частка енергії з відновлюваних джерел має становити 11% від споживання первинних енергоресурсів. «Національним планом...» передбачається, що у 2020 році у системах опалення, вентиляції та кондиціонування використання відновлюваних джерел становитиме 5,8 млн. т н.е., з них споживання біомаси має скласти 4,85 млн. т н.е. В приватному секторі використання відновлюваних джерел енергії в 2020 році має досягти 1,2 млн. т н.е.

Згідно чинної «Енергетичної стратегії України», необхідно забезпечити 25% ВДЕ у загальному постачанні первинної енергії до 2035 року, при цьому з біомаси, біопалива та відходів до 11,5% у загальному постачанні первинної енергії.



Низка великих міст України взяла на себе зобов'язання з переходу на 100% використання енергії з відновлюваних джерел до 2050 року, зокрема Львів, Житомир, Кам'янець-Подільський та Чортків. Такі амбітні цілі потребують залучення найкращих сучасних технологій, особливо в сфері теплопостачання. Специфіка міського планування не завжди дозволяє розміщувати традиційні твердопаливні котельні на біомасі, які нині є основною технологією виробництва теплової енергії з використанням твердої біомаси, тому доцільно і вигідно застосовувати попередньо підготовлені біопалива, в тому числі отримані шляхом піролізу. Шляхом піролізу можливо отримати рідку фракцію з твердої біомаси, яку можна зручно та дешево транспортувати, зберігати та використовувати. Рідке піролізне паливо має досить високу енергетичну щільність у порівнянні з твердою біомасою та хороші фізико-хімічні характеристики, що дозволяє спалювати в котлах без додаткової обробки та транспортувати його на відстані більше 100 км. Після подальшої його обробки, можливо його застосовувати у двигунах внутрішнього згоряння та турбінах.

Перспективними є технології абляційного піролізу, піроліз у киплячому, циркулюючому киплячому шарі, двох реакторах киплячого шару, циклонний та вакуумний піроліз.

Абляційний піроліз у порівнянні з іншими видами швидкого піролізу має додаткові особливості: високу швидкість руху частинок біомаси відносно нагрітої поверхні реактора та високий тиск, прикладений до частинок, що приводить до значних швидкостей абляції.

Реалізація процесу абляційного піролізу, як і інших видів швидкого піролізу, вимагає вирішення ряду відомих технічних проблем. Вони пов'язані з такими аспектами як попередня сушка та обробка сировини, розмір частинок біомаси, конструкція реактора та спосіб його нагріву, температура та спосіб теплопередачі в зоні реакції, час перебування продуктів піролізу в паровій фазі, вторинний крекінг первинних продуктів, очистка рідкого продукту від частинок вуглистої речовини, уловлювання та збір піропалива.

В дисертаційній роботі Зубенка Віталія Ігоровича на тему «Технологія швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу», проведені дослідження націлені на розробку основних науково-технічних положень технології швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу. Піролізне паливо є перспективним паливом для використання в існуючих котельних установках, двигунах внутрішнього згорання та турбінах замість викопних палив. Такий підхід дозволить суттєво розширити можливості енергетичного використання біомаси. З огляду на наведене, вважаю тему дисертаційної роботи актуальною в науковому та прикладному аспектах. Дослідження з використання відновлюваних джерел енергії відносяться до пріоритетних напрямків розвитку науки в Україні.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Основні результати дисертаційної роботи одержано при виконанні науково-дослідних робіт №25 «Розробка технології та пілотної установки для отримання рідкого палива шляхом швидкого піролізу біомаси» (№ ДР 0113U002901), що виконувалась в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Біологічні ресурси і новітні технології біоенергоконверсії» (2013-2017 рр), №30 «Розробка та дослідження технології отримання рідкого палива з біомаси шляхом швидкого піролізу» (№ ДР 0110U005382), виконаної в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Біомаса як паливна сировина» («Біопалива») (2010-2011 рр), та гранта в рамках програми по Нерозповсюдженню Озброєння Міністерства Енергетики США на проект P401 «Розробка абляційного піролізу біомаси для виробництва біонафти» (PNNL-T2-302) за посередництвом Українського Науково-Технологічного Центру (УНТЦ).

3. Наукова новизна одержаних результатів

В роботі вирішене науково-технічне завдання з розроблення основних науково-технічних положень нової прогресивної технології швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу.

Серед нових наукових результатів, отриманих автором *вперше* варто відзначити наступні:

1. Запропоновано нову технологію швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу та проведено комплексні дослідження її теплофізичних характеристик, що дозволило з високою ефективністю переробляти тверду біомасу у рідке піропаливо та енергетично цінні побічні продукти (піролізний газ та вуглисту речовину).

2. Визначено енергетичну ефективність процесу отримання рідкого піропалива шляхом швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу для температурних умов в діапазоні 525-650 °С, що дозволило порівняти запропоновану технологію з іншими технологіями енергетичного використання біомаси.

3. Встановлено залежність енергетичного ККД піролізної установки з абляційним реактором шнекового типу від питомого виходу рідкого піропалива, що дозволило прогнозувати ефективність процесу на основі вимірюваних параметрів.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації достатньо обґрунтовані. Автором проведено ряд експериментальних досліджень та розрахунків на основі удосконалених методик.

Дослідження наведені в дисертаційній роботі містять аналіз наукових засад розвитку сучасних технологій та тенденцій розвитку виробництва піропалива, визначення мети і завдань досліджень, експериментальні дослідження процесу піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу та визначення характеристик сировини та вуглистої речовини, також рекомендації щодо технологічних режимів піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу, розглянуто проект виробництва рідкого піропалива та вуглистої речовини. Дослідження ґрунтуються на об'єктивних даних, отриманих автором, які детально представлені в дисертаційній роботі. Робота завершується висновками.

У **першому пункті** висновків стверджується, що було виконано аналіз основних тенденцій розвитку сучасних технологій виробництва піропалива та розроблено принципові положення нової пропонованої технології швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу, обґрунтовано її основні переваги, зокрема: висока питома продуктивність реактора, поліпшена можливість керування процесом, можливість масштабування технологічного обладнання.

Висновок обґрунтовано матеріалами наведеними в підрозділах 1.2; 1.3.

У **другому пункті** висновків автор вказує, що на основі розроблених положень створено лабораторну піролізну установку з абляційним реактором шнекового типу продуктивністю до 5 кг сировини за годину та експериментально визначено конструкційні параметри елементів установки, що забезпечують її ефективну роботу. Піролізна установка захищена патентом України на винахід.

Висновок зроблено на основі матеріалів, наведених у підрозділах 2.1; 2.5; 2.6.

У **третьому пункті** висновків констатується, що в широкому діапазоні зміни параметрів виконано комплекс експериментальних досліджень піролізу біомаси та на цій основі визначено раціональні режимні характеристики відповідного обладнання, що забезпечують максимальний вихід піропалива близько 50% від маси переробленої сировини: температура корпусу реактора – 600 °С, продуктивність системи подачі сировини – 1,2 кг/год, швидкість обертання гребня шнека реактора – 1 м/с.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених в підрозділах 3.2; 3.3; 3.4; 3.5.

У **четвертому пункті** висновків вказано, що зведені масовий та енергетичний баланси процесу піролізу біомаси в АРШТ. Встановлено, що досягнута енергетична ефективність запропонованої установки швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу складає 65-70%, а з врахуванням використання частини скидної теплоти – до 80%.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 3.6.

У п'ятому пункті висновків констатується, що експериментально встановлено, що отримане рідке піропаливо має нижчу теплоту згорання до 15,7 МДж/кг. Отриманий піролізний газ має підвищений вміст горючих компонентів (до 80%) та відповідно збільшену теплоту згорання – до 19,7 МДж/кг. Отримана вуглиста речовина характеризується найбільшою серед продуктів піролізу теплотою згорання – до 28,4 МДж/кг. Це дозволяє рекомендувати рідке піропаливо та вуглисту речовину як товар для подальшого використання на вугільних або газомазутних електростанціях, а піролізний газ може використовуватися на технологічні потреби.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 3.3; 3.4; 3.5.

У шостому пункті висновків вказано, що в рамках масштабування установки швидкого піролізу створено демонстраційну установку продуктивністю до 50 кг сировини на годину та проведено експериментальні дослідження, в результаті яких отримано питомий вихід рідкого піропалива на рівні 50%. Це доводить можливість масштабування технології при збереженні кількісних та якісних характеристик отриманих продуктів піролізу.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 3.8.

У сьомому пункті констатується, що виконано техніко-економічну оцінку рентабельності проектів отримання рідкого піропалива та вуглистої речовини шляхом піролізу біомаси в АРШТ для умов України. Встановлено, що виробництво рідкого піропалива та вуглистої речовини з біомаси є потенційно економічно привабливим проектом у разі використання мобільної піролізної установки потужністю 500 кг/год, що характеризується наступними економічними показниками: інвестиції на суму 4,121 млн. грн; простий термін окупності – 3,5 роки; внутрішня норма рентабельності – 39%.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 4.2.

У восьмому пункті висновків стверджується, що 60% витрат тепла на нагрів абляційного реактора можна покривати за рахунок спалювання виробленого

піролізного газу для скорочення потреб установки в електричній енергії та відповідно зменшення ціни виробленого рідкого піропалива та вуглистої речовини.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 4.2.

У дев'ятому пункті висновків вказується, що було наведено практичні результати роботи щодо кількісних та якісних характеристик продуктів технології швидкого піролізу біомаси можуть бути використані в подальшому для комп'ютерного моделювання відповідних процесів, що значно прискорить та здешевить розробку обладнання для процесу швидкого піролізу.

Висновок зроблено на основі матеріалів наведених у підрозділі 3.2; 3.3; 3.4; 3.5 3.8.

Результати експериментальних досліджень отримані з використанням сучасного обладнання, приладів та програмно-апаратних засобів, застосуванням стандартизованих методик вимірювання величин, належною оцінкою похибок прямих та опосередкованих вимірювань.

Результати досліджень пройшли апробацію шляхом їх публікації в провідних вітчизняних та зарубіжних фахових виданнях, доповідями на вітчизняних та міжнародних конференціях.

5. Наукове значення роботи

Внаслідок досліджень було запропоновано нову технологію швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу та проведено комплексні дослідження її теплофізичних характеристик, що дозволило з високою ефективністю переробляти тверду біомасу у рідке піропаливо та енергетично цінні побічні продукти.

Обґрунтовано вибір раціональних режимних та конструкційних параметрів піролізних установок з абляційним реактором шнекового типу, що забезпечують максимальний вихід рідкого піропалива.

Встановлено залежність енергетичного ККД піролізної установки з абляційним реактором шнекового типу від питомого виходу рідкого піропалива, що дозволило прогнозувати ефективність процесу на основі вимірюваних параметрів.

6. Практична цінність отриманих результатів

У дисертаційній роботі було визначено раціональні режимні характеристики процесу та встановлено конструкційні параметри демонстраційної мобільної піролізної установки продуктивністю 50 кг/год.

Внаслідок проведеної серії експериментальних досліджень на демонстраційній мобільній установці продуктивністю 50 кг/год встановлено, що питомий вихід рідкого піропалива та його енергетичні характеристики аналогічні отриманим на лабораторній установці. Це доводить здатність даної технології до масштабування та можливості її широкого застосування в енергетичного секторі при дотриманні розроблених рекомендацій щодо подальшого її розвитку та комерціалізації.

Визначено економічні умови, за яких проекти отримання піропалива на мобільних піролізних установках можуть бути рентабельними в умовах України.

Технологію швидкого піролізу в АРШТ, розроблену в цій роботі, було використано ТОВ «Біомаса-Карбон» в комерційному проекті «Coaching Services for STI PFAN CIS & Central Asia Project Development & Financing Initiative» (CISCA-PDFI, International Center for Environmental Technology Transfer). Результати впровадження підтверджено відповідним актом.

Також практична цінність результатів дисертаційної роботи підтверджується патентом України на винахід.

7. Повнота викладення основних положень дисертації в опублікованих роботах

Основні результати досліджень дисертаційної роботи опубліковані у 13 наукових працях, а саме: 4 статті у фахових наукових виданнях, що входять до відповідного переліку МОН України, 1 стаття у іноземному виданні, що індексується міжнародними наукометричними базами даних, 1 патент на винахід, 7 публікацій у збірниках матеріалів конференцій.

Кількість робіт та видання, в яких опубліковані статті автора, відповідають вимогам ДАК МОН України. Зміст публікацій відповідає матеріалам, викладеним у дисертації.

8. Зміст дисертації та її завершеність

Дисертаційна робота, що подана на відгук, являє собою рукопис, обсяг якого складає 125 сторінок основної текстової частини, у т.ч. 34 таблиці і 47 рисунків, а також 4 додатки. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків за результатами досліджень, переліку використаних літературних джерел, який містить 127 найменувань та додатків.

У вступі автор обґрунтовує актуальність теми дисертації та вибір теми досліджень, формулює мету роботи, яка полягає в розробленні основних науково-технічних положень нової прогресивної технології швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу, формулює задачі дослідження, методи досліджень, визначає наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, надає відомості про публікацію та апробацію результатів роботи, надає інформацію про особистий внесок у досягнення поставленої мети.

У першому розділі викладено критичний огляд сучасних технологій та тенденцій розвитку виробництва піролізного палива в світі, огляд діючих піролізних установок, передумов та перспектив розвитку виробництва піролізного палива в Україні. Розглянуто сучасні наукові положення про механізми отримання рідкого піролізного палива з біомаси шляхом швидкого піролізу.

Показано, що разом з прямим спалюванням і газифікацією піроліз є ефективним методом термохімічної переробки біомаси. Відмічено, що швидкий піроліз біомаси є технологією термохімічної конверсії, яка дає можливість максимізувати вихід рідкого або газоподібного продукту, в залежності від температури процесу.

На основі виконаного критичного аналізу розвитку досліджень технологій піролізу твердої біомаси та літературних даних про стан досліджень, розвитку і впровадження технологій піролізу, сформульовані мету і основні завдання дослідження, які викладені наприкінці першого розділу.

У другому розділі розроблено основні науково-технічні положення нової прогресивної технології швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі

шнекового типу. Важливою особливістю є застосування в реакторі шнеку зі змінним кроком витків. За рахунок цього поліпшуються умови нагрівання сировини до необхідної температури, а продукти піролізу максимально швидко видаляються з 3-ї зони реактора та зростає ефективність абляції. Методика досліджень передбачала реалізацію послідовності процесів подача біомаси в реактор, де здійснювалася її нагрівання до температури розкладу та одночасне притискання шнеком частинок біомаси до стінок реактору, очистка парогазових продуктів піролізу від вуглистої речовини, охолодження парогазових продуктів піролізу та конденсація пірорідини, спалювання газових продуктів піролізу з метою утилізації. Описано методику експериментальних досліджень процесу піролізу біомаси в АРШТ.

На основі розроблених положень створено лабораторну установку з абляційним реактором шнекового типу продуктивністю до 5 кг сировини за годину та експериментально визначено конструкційні параметри елементів установки, що забезпечують її надійну та ефективну роботу, а також здійснено масштабування установки та створено демонстраційну установку продуктивністю до 50 кг сировини на годину.

У третьому розділі викладено результати експериментальних досліджень процесу піролізу біомаси в АРШТ, а також рекомендації щодо технологічних режимів. В рамках дослідження процесу піролізу проведено серію експериментів. Встановлено, що основними параметрами установки, які мають найбільш суттєвий вплив на вихід того чи іншого продукту піролізу є: температура реактору, швидкість руху частинки біомаси в реакторі та продуктивність системи подачі сировини.

Виявлено, що процес абляційного піролізу біомаси в реакторі шнекового типу характеризується суттєвою невизначеністю. При однакових заданих параметрах установки питомий вихід продуктів піролізу коливався в досить широкому діапазоні значень. Невизначеність процесу піролізу обумовлена різною силою притискання шнеком частинки біомаси до внутрішньої поверхні реактора в залежності від продуктивності системи подачі та насипної щільності сировини.

Порівняння характеристик піропалива, отриманого на експериментальній

установці ІТТФ та інших лабораторій, показало, що отримане в роботі піропаливо не поступається за основними характеристиками піропаливам, отриманими іншими дослідниками.

Визначені на сучасному хроматографі експериментальні дані складу піролізного газу показали, що його калорійність знаходиться в межах від 12,67 до 19,72 МДж/м³, їх можна застосовувати для обігріву реактора з метою забезпечення автономної роботи установки. Показано, що вуглиста речовина має досить високу нижчу теплоту згорання (~28,2 МДж/кг) та може бути використана в якості твердого палива, наприклад, у водогрійних котлах.

Складено матеріальний та енергетичний баланс з урахуванням основних складників, визначено енергетичний ККД установки з врахуванням теплових втрат, що можуть бути повернені до енергетичного балансу установки та проведено оцінку невизначеності результатів вимірювання

Проведено також експериментальні дослідження на масштабованій установці більшої потужності. Дослідження процесу піролізу біомаси в АРШТ, що проведені на демонстраційній піролізній установці підтвердили результати, що отримані на лабораторній установці.

В кінці розділу наведено рекомендації щодо оптимальних технологічних режимів роботи абляційних піролізних установок з реакторами шнекового типу.

У четвертому розділі розглядаються техніко-економічні показники виробництва рідкого піропалива та вуглистої речовини на мобільній піролізній установці продуктивністю 500 кг/год по сировині в умовах України з метою подальшого спалювання продуктів піролізу на існуючих вугільних та газо-мазутних електростанціях або котельнях.

Методика розрахунку показників економічної ефективності базувалася на методичних рекомендаціях по оцінці ефективності інвестиційних проектів та їх відбору для фінансування, а також враховувала більш сучасні розробки по удосконаленню, адаптації та уточненню показників.

Показано, що проект виробництва піропалива та вуглистої речовини з біомаси

є економічно привабливим та характеризується наступними економічними показниками: інвестиції на суму 4,121 млн. грн, простий термін окупності складає 3,5 років, дисконтований термін окупності – 3,9 років; внутрішня норма рентабельності – 39%; чиста приведена вартість – 8,22 млн. грн; індекс прибутковості – 2,8.

Усі чотири розділи дисертаційної роботи логічно пов'язані між собою і є цілісним завершеним дослідженням. Дисертаційна робота та автореферат написані українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Загалом виклад роботи та автореферату чітко і зрозуміло висвітлюють методи досліджень та отримані результати. Мова та стиль дисертації відповідають вимогам до науково-технічних текстів та публікацій.

Зміст автореферату повністю відображає зміст дисертації, а основні наукові положення, що містяться в них, ідентичні.

9. Зауваження по дисертаційній роботі.

1. Є низка мовних помилок, таких як «поступає» замість надходить, «затрачена» замість «витрачена», «при включенні» замість «при вмиканні».

2. В розділі 2, вказано, що «З метою знаходження оптимальної конструкції шнеку з точки зору максимального виходу рідкого піропалива було випробувано чотири різних шнеки в експериментах по швидкому піролізу біомаси». Далі не зрозуміло, в яких з наведених експериментах який варіант шнеку використовувався.

3. В таблиці 2.2 вказано лише одне значення частоти обертання шнека, що відповідає верхній межі, а не діапазон частот, в якому відбувалися експериментальні дослідження.

4. В підрозділі 2.3. та 2.7 вказано, що використовувалася допоміжна пускова рідина – дизельне паливо. Проте в методиці проведення експериментів не згадано, яким чином при відборі зразків піропалива було виключено потрапляння дизелю у відібрані зразки.

5. В підрозділі 3.4. Характеристики продуктів піролізу, таблиця 3.3 вказані характеристики піропалива, що містять дві фази одним значенням. Доцільно було-б детальніше розглянути умови розшарування фаз, їх характеристики та рекомендації щодо використання такого піропалива

6. В підрозділі 3.9. «Рекомендації щодо оптимальних технологічних режимів» рекомендовано забезпечувати «температуру зовнішньої поверхні корпусу абляційного реактора на рівні близько 600 °С». В експериментальній установці корпус реактора та шнек були виготовлені з жароміцних сталей 40X10C2 та 20X13, верхня межа діапазону робочих температур яких складає 550 °С. Разом з рекомендацією по температурі поверхні корпусу доцільно було б вказати рекомендації щодо використання сталей, що можуть стабільно працювати при вищих температурах.

Зроблені зауваження мають формальний або рекомендаційний характер та не впливають на загальну позитивну оцінку роботи.

10. Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі

В цілому дисертація Зубенка В. І. є самостійно виконаним завершеним науковим дослідженням, яке відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки в Україні.

В дисертації на основі виконаних експериментальних та розрахункових досліджень отримано нові науково обґрунтовані результати, які в сукупності розв'язують науково-технічне завдання розроблення основних науково-технічних положень нової прогресивної технології швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу, що поглиблює розуміння фізико-хімічних процесів, які відбуваються при піролізі біомаси.

За напрямом обраних і вирішених завдань дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.14.08 – перетворювання відновлюваних видів енергії.

Наведені зауваження до дисертаційної роботи не мають принципового характеру і не можуть істотно вплинути на її науковий рівень, новизну та достовірність отриманих результатів.

Враховуючи актуальність теми, достатній ступінь обґрунтованості, наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів, вважаю, що дисертаційна робота «Технологія швидкого піролізу біомаси в абляційному реакторі шнекового типу» відповідає вимогам пп. 9, 11 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24 липня 2013р., до кандидатських дисертацій, а її автор Зубенко Віталій Ігорович заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.08. – перетворювання відновлюваних видів енергії.

Офіційний опонент,
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник відділу
органічних відновлюваних енергоносіїв
Інституту відновлюваної енергетики НАН України



Клюс С. В.

Підпис засвідчую:

Зов. відділу кадрів *О. В. Реорченко*

