

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

2'2019

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідоцтво Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
постановою президії ВАК України
як наукове фахове видання
(протокол № 1-05/3 від 14.04.2010 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Л. Л. Товажнянський,
член-кор. НАН України

Відповідальний секретар
К. О. Горбунов,
канд. техн. наук, доц.

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

В. П. Мешалкін, *д-р техн. наук, проф.*,
РХТУ Москва (Росія)
Д. Б. Ферст, *ВА, ген. директор*
F. Executive Co. (Великобританія)
Й. Клемеш, *PhD, DSc (Hon)*
ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина)
та ун-та Манчестера (Великобританія)
В. Плешу, *PhD, проф.*, *ун-т POLITEHNICA*
Бухарест (Румунія)
П. Стехлік, *PhD, проф.*, *VUT Брно (Чехія)*
О. Б. Аніпко, *д-р техн. наук, проф.*
Є. І. Сокіл, *член-кор. НАН України*
П. О. Качанов, *д-р техн. наук, проф.*
В. А. Малярєнко, *д-р техн. наук, проф.*
Д. Ф. Сімбірський, *д-р техн. наук, проф.*
В. П. Шапорєв, *д-р техн. наук, проф.*
Ю. Б. Данилов, *д-р техн. наук, проф.*
С. В. Яковлєв, *д-р фіз.-мат. наук, проф.*
Ю. М. Мацевітій, *акад. НАН України*
В. Є. Ведь, *д-р техн. наук, проф.*
П. О. Капустенко, *акад. Академії будівництва України*
О. П. Арсєнєва, *д-р техн. наук, доц.*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Малярєнко В. А., Казарова І. О.,
Сенецький О. В., Темнохуд О. О.
Дослідження впровадження газопоршневих
та газотурбінних двигунів при переведенні
котельні в режим когенерації.....3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Некрасов П. О., Гудзь О. М., Руднєва С. І.,
Некрасов О. П.
Кінетика і термодинаміка ферментативного
процесу виробництва жиркових систем з
мінімальним вмістом транс-ізомерів.....11
Тесленко М. Г., Пермяков В. І.
Аналіз та визначення оптимальних параметрів
методу вимірювання кута змочування за
зображенням шляхом дослідження
обумовленості задачі із використанням
математичної моделі проекції краплі.....21

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Лабейко М. А., Литвиненко О. А.,
Любченко Н. М., Гладкий Ф. Ф.*

Деякі аспекти щодо гідролізу хлорогенової
кислоти, отриманої зі соняшникового
шроту.....32

*Римчук Д. В., Куц А. І.,
Драгомирецький В. О.*

Підвищення герметичності нафтових і
газових свердловин.....38

Фоменко Д. С., Костенко В. Л.

Динамічна неврівноваженість металевих
тіл обертання газоперекачувальних
агрегатів газокompресорної
станції.....47

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Мохаммед Алтагер Албаршеши, Алкіб

Ахмед М. Мохаммед Алджалі,

Нагла Фаєз Аллабаг

Сучасний стан розробок в галузі плазмової
газифікації та перероблення

відходів.....59

Сторінка редколегії 69

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 6 від 24.05.2019 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. –
Харків : НТУ «ХПІ», 2019. – № 2. – 72 с.

Збірник наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій
різноманітних галузей промисловості.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2019

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

2'2019

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 14.06.2019 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–60.
Зам. № 75. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

УДК 621.165

Маляренко В.А., д.техн.н., професор¹, Казарова І.О., к.техн.н., доц.²,
Сенецький О.В., к.техн.н., с.н.с.³, Темнохунд О.О., аспірант¹

¹Харківський національний університет міського господарства ім. О.М.Бекетова,
Україна

²Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Україна

³Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ГАЗОПОРШНЕВИХ ТА ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ПЕРЕВЕДЕННІ КОТЕЛЬНІ В РЕЖИМ КОГЕНЕРАЦІЇ

Ключові слова: газопоршневий двигун, газотурбінний двигун, когенерація, котельня

Постановка проблеми. Вибір типу двигуна, а також їх кількості для приводу електрогенераторів будь-якої потужності є складним техніко-економічним завданням. Переведення котельні в міні-ТЕЦ шляхом впровадження газопоршневих та газотурбінних двигунів дозволяє повністю відмовитися від зовнішнього електропостачання, але необхідно зважувати всі ризики, що виникають при цьому (аварійні ситуації, відсутність палива та ін.).

Принципові переваги та недоліки газопоршневих та газотурбінних установок неодноразово аналізувалися в технічній літературі [1–12], в рекламних проспектах виробників електростанцій, на сторінках Інтернету [1–12].

Метою цієї статті є визначення та порівняння характеристик та показників роботи газопоршневих та газотурбінних двигунів з урахуванням особливостей їх впровадження на котельнях.

Виклад основного матеріалу. На вибір типу та схеми енергоустановки, зокрема котельні, впливає велика кількість різних факторів, а саме: 1) технічна можливість установки обладнання (наявність і можливість використання тих чи інших, паливних ресурсів; особливості існуючої інфраструктури (нове будівництво або модернізація); надійність обладнання; великі періоди середніх і капітальних ремонтів; мінімальні витрати на техобслуговування і витратні матеріали; максимальне завантаження протягом року; 2) фінансово-економічна доцільність установки обладнання (мінімальний термін окупності капіталовкладень; отримання максимуму прибутку; оптимальні обсяги, джерела та способи фінансування (покупка, оренда, лізинг); 3) екологічні показники (кліматичне і географічне положення розглядуваного об'єкта; мінімум викидів шкідливих речовин; нешкідливість на експлуатаційний персонал; 4) експлуатаційні показники (проста процедура запуску і зупинки; легкість контролю основних показників установки); 5) організаційні питання (під час установки когенератора буде потрібно значне збільшення споживання палива (необхідно виділення лімітів); зв'язок між підрозділами, що беруть участь у розробленні та реалізації проекту). Спроби порівняти між собою в

якості приводу поршневі та газотурбінні двигуни найчастіше робляться за умови використання як палива природного газу. Зазвичай наводяться узагальнені відомості про різницю у витратах палива, у вартості двигунів без жодного врахування їх потужності та умов роботи. Часто відзначається, що склад споживачів встановленою електричною потужністю меншою 10 МВт переважніше формувати на базі поршневих двигунів, а більшої потужності – на базі газотурбінних. Приймати ці рекомендації як аксіому не слід. Очевидно одне: кожен тип двигуна має свої переваги та недоліки, і при виборі приводу потрібні деякі, хоча б орієнтовні, кількісні критерії їх оцінки [1–12].

В даний час на українському енергетичному ринку пропонується досить широка номенклатура як поршневих, так і газотурбінних двигунів. Обробка наявної інформації дозволила сформувати наведену нижче табл. 1, яка містить як кількісну, так і якісну оцінку переваг та недоліків ГПД і ГТУ. На жаль, частина характеристик взята з рекламних матеріалів, перевірити достовірність яких важко або практично неможливо.

Таблиця 1 – Порівняння основних показників поршневих і газотурбінних двигунів, що працюють у складі електростанцій

Показник	Тип двигуна	
	Поршковий	Газотурбінний
1	2	3
Діапазон одиничних потужностей двигуна (ISO), МВт	0,1...80,0	0,03...265,0
Вплив температури зовнішнього повітря на ККД двигуна	Практично не впливає	При зниженні температури до мінус 20 °С ККД збільшується приблизно на 1,5 % абс.
Вплив температури зовнішнього повітря на потужність двигуна	Практично не впливає	При зниженні температури до мінус 20 °С потужність збільшується приблизно на 10-20 %, при збільшенні до +30 °С – зменшується на 15–20 %.
Паливо	Газообразне, рідке	Газообразне, рідке (за спецзаказом)
Необхідний тиск паливного газу, МПа	0,01...0,035	Більше 1,2
ККД по виробництву електроенергії при роботі на газі (ISO)	От 31 до 48 %	В простому циклі від 25 до 38 %
Питома витрата палива при 100 % и 50 % навантаженні	0,264...0,329 м ³ /кВт·год.	0,375...0,503 м ³ /кВт·год.

Продовження таблиці 1

1	2	3
Вплив перемінного навантаження	Не бажана тривала робота на навантаженнях менш 50 % (сильно впливає на інтервали обслуговування); при меншій одиничній потужності агрегату, більш гнучка робота електростанції в цілому і вище надійність енергопостачання	Робота на часткових навантаженнях (менше 50 %) не впливає на стан турбіни; при високій одиничній потужності агрегату, відключення викликає втрату 30 ... 50 % потужності електростанції
Падіння напруги і час відновлення після 50 % набросу навантаження	22 % 8 с	40 % 38 с
Темп росту експлуатаційних витрат зі збільшенням терміну служби	Менш високий	Більш високий
Можливості використання утилізованої теплоти	<i>Високопотенційну теплоту</i> вихлопних газів - на виробництво пари для вироблення електроенергії <i>Низькопотенційну теплоту</i> , що відводиться від системи охолодження, - на нагрів води до температури 90–115 С	На виробництво пари для вироблення електроенергії, холоду, опріснення води тощо; на нагрів води до температури 150 С.
Моторесурс, годин	Більше (до 300 000 для середньо оборотних двигунів)	Менше (до 100 000)
Вплив температури зовнішнього повітря на кількість утилізованої теплоти	Практично не впливає	При зниженні температури повітря кількість теплоти при наявності регульованого лопаточного апарату у газовій турбіні майже не зменшується, при його відсутності – зменшується
Маса енергоблоку (двигун з електрогенератором і допоміжним обладнанням), кг/кВт	Суттєво вище (22,5)	Суттєво нижче (10,0)

1	2	3
Габарити енергоблоку, м	Більше (18,3х5,0х5,9 при одиничній потужності агрегату 16 МВт без системи охолодження)	Менше (19,9х5,2х3,8 при одиничній потужності агрегату 25 МВт)
Питома витрата масла, г/кВтгод	0,3...0,4	0,05
Кількість пусків	Не обмежено і не впливає на скорочення моторесурсу	Не обмежено, але впливає на скорочення моторесурсу
Вартість капремонту	Дешевше	Дорожче
Екологія (шкідливі викиди у вихлопі)	Концентрація вище (в мг/м ³), але загальний об'єм вихлопу (в м ³) менше	Концентрація менше (в мг/м ³), але загальний об'єм вихлопу (в м ³) більше
Обслуговування	Зупинка після кожних 1000 год роботи, заміна мастила; кап. ремонт через 70000 год, виконується на місці встановлення	Зупинка після кожних 2000 год (дані фірми Solar); кап. ремонт через 30000 год, виконується на спеціальному заводі
Розміщення в будівлі	Вимагає більше місця, тому що має більшу вагу на одиницю потужності; не вимагає компресора для дотискування газу, робочий тиск газу на вході – 0,1...0,35 бар	При потужності електростанції більш 5 МВт виграш від меншого розміру приміщення не значний; мінімальний робочий тиск газу на вході – 12 бар, потрібно газ високого тиску, або дотискний компресор
Ремонтопридатність	Ремонт проводиться на місці; ремонт вимагає менше часу	Ремонт проводиться на спеціальних заводах; витрати часу і грошей на транспортування, центрування тощо

В табл. 1 наведені узагальнені дані, деякі з них подані у відповідності зі стандартами ISO, фактичні ж умови роботи двигунів можуть істотно відрізнятися від стандартних.

Порівняння ГТУ і ГПД в складі міні-ТЕЦ показує, що установка газових турбін можлива на об'єктах, які мають електричні навантаження більше 14–15 МВт, але через високий витрати газу турбіни рекомендуються для електростанцій набагато більшої потужності (від 50 МВт) зі стаціонарним електричним та тепловим навантаженням.

Для багатьох сучасних електрогенеруючих установок 200 тис. мотогодин експлуатації не є критичною величиною.

Якісні газопоршневі установки сьогодні так само успішно долають 200 тис. мотогодин експлуатації. Дотримання графіка планового технічного обслуговування і поетапної заміни частин генеруючого обладнання, схильних до зносу (підшипники, інжектори, різне допоміжне обладнання) робить подальшу експлуатацію установок економічно доцільною [1-12].

Одним з критеріїв вибору виробника ГТУ або ГПД (українського або закордонного) є вартість обслуговування в процесі експлуатації.

Висновок

Проведено порівняльний аналіз характеристик електрогенеруючих установок на базі ГПД та ГТУ. За результатами виявлено, що діапазон потужності поршневих двигунів від 10 кВт до 6 МВт, а у газотурбінних установок від 100 кВт до 265 МВт. Поршнєві двигуни більш ефективно працюють їх ККД становить до 48 %, а газотурбінних установок до 38 %. Поршнєві двигуни більш ефективно працюють на часткових режимах навантаження. Перевагою поршневих двигунів є можливість ремонту на місці. Для котелен ЖКГ важливим фактором при виборі електрогенеруючих установок служить ступінь завантаженості протягом року. З огляду манерності та виходячи з наведених порівняльних характеристик більш доцільним буде обрати для реалізації на об'єктах комунальної енергетики ГПД [1-8].

Література

1. Маляренко В.А., Шубенко О.Л., Андрєєв С.Ю., Бабак М.Ю., Сенецький О.В., Когенераційні технології в малій енергетиці : монографія // Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Ін-т проблем машинобуд. ім. А.М. Підгорного. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 454 с.
2. Казарова І.О. Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації: дис. канд. техн. наук : 05.14.06 / Казарова Інна Олександрівна – Харків, 2017. – 194 с.
3. Казарова І.О. Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.06 "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" / І.О. Казарова. – Харків, 2018. – 24 с.
4. Шубенко А.Л., Маляренко В.А., Сенецький А.В., Бабак Н.Ю., Темнохуд І.А. (Казарова І.О.), Сравнительный анализ характеристик поршневых и газотурбинных двигателей // Инновации в сельском хозяйстве. – М, 2016. – №4. – С. 347–352. ISSN 2304-4926
5. Андрєєв С.Ю., Маляренко В.А., Темнохуд І.О. (Казарова І.О.), Сенецький О.В. Можливості підвищення енергоефективності теплових мереж шляхом впровадження когенерації // Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник НТУ «ХПІ»: Зб. наук. праць. Харків: НТУ «ХПІ», 2015. № 17(1126). С. 147-155. ISSN 2078-774X.

6. Губич А. Применение газотурбинных двигателей малой мощности в энергетике // Газотурбинные технологии, 2001. № 6. С. 30–31.

7. Буров В.Д. Газотурбинные и газопоршневые энергетические установки малой мощности // Горный журнал, 2004. специальный выпуск. С. 87–89.

8. Что лучше, надежнее, экономичнее для автономной электростанции: газопоршневые или газотурбинные силовые агрегаты? [Электронный ресурс] // Новая Генерация. http://www.manbw.ru/analytics/which_is_better_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html

9. Van der Waals J.D. On the Continuity of the Gaseous and Liquid States // New York: Dover, 2004. 320 p. ISBN 0486495930.

10. Soave G. Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State // Chemical Engineering Science, 1972. № 27. PP. 1197–1203.

11. Heidemann R.A., Prausnitz J.M. A Van der Waals-type equation of state for fluids with associating molecules // Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1976. Vol. 73. № 6. PP. 1773–1776.

12. Garland C.W., Nibler J.W., Shoe-maker D.P. Experiments in Physical Chemistry. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009. 100 p.

Bibliography (transliterated)

1. Maliarenko V.A., Shubenko O.L., Andrieiev S.Yu., Babak M.Yu., Senetskyi O.V., Koheneratsiini tekhnolohii v malii enerhetytsi : monohrafiia [Cogeneration Technologies in Small Energy : Monograph] // Kharkiv. nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova, In-t problem mashynobud. im. A. M. Pidhornoho. – Kharkiv : KhNUMHim. O.M. Beketova, 2018. – 454 p.

2. Kazarova I.O. Pidvyshchennia efektyvnosti system enerhopostachannia za rakhunok vprovadzhennia koheneratsii [Improving the Efficiency of Power Supply Systems through the Introduction of Cogeneration] : dys. kand. tekhn. nauk [Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences] : 05.14.06 / Kazarova Inna Oleksandrivna – Kharkiv, 2017. – 194 p.

3. Kazarova I.O. Pidvyshchennia efektyvnosti system enerhopostachannia za rakhunok vprovadzhennia koheneratsii [Improving the Efficiency of Power Supply Systems through the Introduction of Cogeneration]: avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia kand. tekhn. nauk : spets. 05.14.06 "Tekhnichna teplofizyka ta promyslova teploenerhetyka" [Author's Abstract of Thesis for a Candidate Degree in Technical Sciences : speciality 05.14.06 – Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering] / I.O. Kazarova. – Kharkiv, 2018. – 24 p.

4. Shubenko A.L., Maliarenko V.A., Senetskii O.V., Babak N.Yu., Temnohud I.A. (Kazarova I.O.), Sravnitelnyi analiz kharakteristik porshnevnykh i gazoturbinnnykh dvigateley// Innovatsii v selskom khozyaystve [Comparative Analysis of the Characteristics of Piston and Gas Turbine Engines]. – M., 2016. – #4. – Pp. 347-352. ISSN 2304-4926.

5. Andrieiev S.Yu., Maliarenko V.A., Temnohud I.O. (Kazarova I.O.), Senetskyi O.V. Mozhlyvosti pidvyshchennia enerhoefektyvnosti teplovykh merezh shliakhom vprovadzhennia koheneratsii [Opportunities to Improve the Energy Efficiency of Heating

Networks through the Introduction of Cogeneration] // Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia. Visnyk NTU «KhPI» [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute” series: “Power and heat engineering processes and equipment”]: Zb. nauk. prats. Kharkiv: NTU «KhPI», 2015. # 17(1126). Pp. 147-155. ISSN 2078-774X.

6. Gubich A. Primeneniye gazoturbinykh dvigateley maloy moshchnosti v energetike [The Use of Gas Turbine Engines of Low Power in the Energy Sector] // Gazoturbinye tekhnologii, 2001. # 6. Pp. 30–31.

7. Burov V.D. Gazoturbinye i gazoporshnevyye energeticheskiye ustanovki maloy moshchnosti [Gas Turbine and Gas Piston Power Plants of Low Power] // Gornyy zhurnal, 2004. spetsialnyy vypusk [special issue]. Pp. 87–89.

8. Chto luchshe, nadezhneye, ekonomichneye dlya avtonomnoy elektrostantsii: gazoporshnevyye ili gazoturbinye silovyye agregaty? [Elektronnyy resurs] [What is Better, More Reliable, More Economical for an Isolated Power Plant: Gas Piston or Gas Turbine Power Units? [Electronic resource]] // Novaya Generatsiya. http://www.manbw.ru/analitics/which_is_better_gas_piston_or_gas_turbine_power_units.html

9. Van der Waals J.D. On the Continuity of the Gaseous and Liquid States // New York: Dover, 2004. 320 p. ISBN 0486495930.

10. Soave G. Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State // Chemical Engineering Science, 1972. № 27. PP. 1197–1203.

11. Heidemann R.A., Prausnitz J.M. A Van der Waals-type equation of state for fluids with associating molecules // Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1976. Vol. 73. № 6. PP. 1773–1776.

12. Garland C.W., Nibler J.W., Shoe-maker D.P. Experiments in Physical Chemistry. New York: McGraw-Hill Higher Education, 2009. 100 p.

УДК 621.165

Малярєнко В.А., Казарова І.О., Сєнєцький О.В., Темнохуд О.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ГАЗОПОРШНЕВИХ ТА ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ ПРИ ПЕРЕВЕДЕННІ КОТЕЛЬНІ В РЕЖИМ КОГЕНЕРАЦІЇ

Розглянуті напрями модернізації котельні за допомогою впровадження газопоршневих та газотурбінних двигунів при переведенні в режим когенерації. Порівняні такі основні характеристики роботи газопоршневих та газотурбінних двигунів як вплив перемінного навантаження, вплив температури зовнішнього повітря на потужність двигуна, можливості використання утилізованої теплоти та інші важливі фактори.

Ключові слова: газопоршневий двигун, газотурбінний двигун, когенерація, котельня.

УДК 621.165

Маляренко В.А., Казарова И.А., Сенецкий А.В., Темнохуд А.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВНЕДРЕНИЯ ГАЗОПОРШНЕВЫХ И ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ПЕРЕВОДЕ КОТЕЛЬНОЙ В РЕЖИМ КОГЕНЕРАЦИИ

Рассмотрены направления модернизации котельной с помощью внедрения газопоршневых и газотурбинных двигателей при переводе в режим когенерации. Сравнены такие основные характеристики работы газопоршневых и газотурбинных двигателей как влияние переменной нагрузки, влияние температуры наружного воздуха на мощность двигателя, возможности использования утилизированной теплоты и другие важные факторы.

Ключевые слова: газопоршневой двигатель, газотурбинный двигатель, когенерация, котельная.

Malyarenko V. A., Kazarova I.O., Senetskyi O.V., Temnokhud O.O.

STUDIES OF THE INTRODUCTION OF GAS PISTON AND GAS TURBINE ENGINES UPON THE BOILER HOUSE SWITCHING TO COGENERATION MODE

The directions of modernization of the boiler house with the help of the introduction of gas piston and gas turbine engines when switching to cogeneration mode have been considered. The main characteristics of the operation of gas piston and gas turbine engines, such as the effect of variable load, the effect of outside air temperature on engine power, the possibility of using recycled heat, and other important factors have been compared.

Key words: gas piston engines, gas turbine engines, cogeneration, boiler house.

УДК 665:664.3

Некрасов П.О., д.техн.н., професор, Гудзь О.М., Руднєва С.І., к.техн.н., доцент,
Некрасов О.П., к.техн.н., професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

КІНЕТИКА І ТЕРМОДИНАМІКА ФЕРМЕНТАТИВНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЖИРОВИХ СИСТЕМ З МІНІМАЛЬНИМ ВМІСТОМ ТРАНС-ІЗОМЕРІВ

Ключові слова: переестерифікація, ліпаза, математичне моделювання, метод комплексів, газорідинна хроматографія.

В теперішній час основними технологіями одержання твердих жирів у промисловості є методи часткової гідрогенізації та хімічної переестерифікації.

Процес гідрогенізації жирів протікає за участю водню і каталізатора (що, як правило, виробляється на основі нікелю) при температурі 180...240 °С. Основними недоліками вказаної технології є великі капітальні інвестиції, висока вартість водню, що використовується, застосування хімічного каталізатора, що призводить до утворення металевих мил, необхідність наступного відбілювання і дезодорації, а також утворення шкідливих для організму людини транс-ізомерів [1–7].

На відміну від гідрогенізації переестерифікацією можна змінити триацилгліцериновий склад жиру або суміші жирів, не змінюючи їх жирнокислотного складу. Поширеними каталізаторами даної реакції служать метилат натрію CH_3ONa , етилат натрію $\text{C}_2\text{H}_5\text{ONa}$ і гідроксид натрію NaOH у суміші з гліцерином. Недоліками цього процесу є відносно висока температура проведення реакції (до 120 °С), забруднення продуктів реакції каталізатором і утворення мил як побічних продуктів [8, 9].

Застосування ферментативної переестерифікації замість гідрогенізації та хімічної переестерифікації має цілий ряд переваг: м'які умови реакції, не потрібні наступні процеси відбілювання або промивання, є можливість регулювання ступеня перетворення, використовуються природні біокаталізатори, що не забруднюють навколишнє середовище, організація виробництва менш складна і більш дешева. Ще однією вагомою перевагою ферментативної переестерифікації є можливість отримання жирових систем з мінімальним вмістом транс-ізомерів, а також природним розподілом ацилів у молекулах ацилгліцеринів. Відомо, що у другій позиції в ацилгліцеридах, що містяться у природі, знаходяться переважно ацили ненасичених кислот. При вказаному способі отримання жирових систем цей природний розподіл залишається завдяки 1,3-специфічності ферменту, що використовується. Тому при травленні як натуральних, так і жирів, що отримано за допомогою ферментативної переестерифікації, з кишечника до крові потрапляють однакові складові жирових компонентів [10–13].

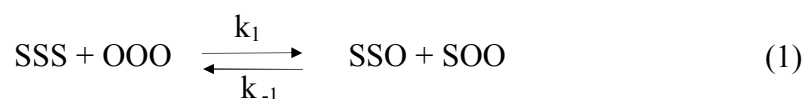
В даний час основними труднощами на шляху до широкого поширення цієї технології є наступні: усе ще відносно висока вартість використовуваного ферментного препарату; недостатня поінформованість і відсутність досвіду роботи з даною техноло-

гією на вітчизняних підприємствах. Крім того, недостатньо глибока, у порівнянні з традиційними способами, вивченість процесу, зокрема бракує системних досліджень кінетики зазначеного процесу.

Мета представленої роботи полягала в комплексному дослідженні та аналізі кінетики і термодинамики ферментативної переестерифікації триацилгліцеринів, яку спрямовано на синтез жирових систем з мінімальним вмістом транс-ізомерів.

Модельні суміші складались з тристеарину та триолеїну у мольному співвідношенні 1 : 1. Вказані триацилгліцерини є головними компонентами сировини, перспективної для виробництва жирових систем з мінімальним вмістом транс-ізомерів. Для утворення гомогенної суміші субстратів при всіх температурах дослідження було використано розчинник – ізооктан. Біокаталіз процесу здійснювався за допомогою ліполітичного препарату Novozym 40086 («Novozymes», Данія). Вказаний препарат є іммобілізованою на силікагелі sn-1,3-позиційно специфічною ліпазою *Rhizomucor miehei*. Кількість біокаталізатора – 10 % мас. по відношенню до маси субстратів. Процес проводили в двох паралелях при температурах 50 °C, 60 °C, 70 °C протягом 6 годин при постійному перемішуванні під шаром азоту. Через визначені проміжки часу відбирались проби, триацилгліцериновий склад яких аналізувався методом високотемпературної газорідинної хроматографії у відповідності із ISO/TS 17383:2014 [14]. Використовувався хроматограф HP 7890B (Agilent Technologies), оснащений полум'яно-іонізаційним детектором (ПІД). Колонка CP-TAP CB for triglycerides, капілярна; її геометричні параметри: довжина 25 м, 0,25 мм внутрішній діаметр, 0,10 мкм товщина нерухомої фази. Програма термостата колонок: 100 °C (1 хв.), 30 °C/хв. до 340 °C, 340 °C (31 хв.) Температура інжектора – 360 °C, температура детектора – 360 °C. Газ-носіє – гелій. Швидкість газу-носія 1,8 см³/хв. Обсяг проби, що вводився, – 1,0 мкл. Всі аналізи здійснювались у двох паралелях. Ідентифікацію піків та калібрування було виконано за стандартами Sigma-Aldrich.

Ферментативна переестерифікація триацилгліцеринів обумовлена одночасним перебігом трьох реакцій:



де k_1 , k_2 і k_3 є константами швидкостей прямих реакцій, і k_{-1} , k_{-2} , k_{-3} – відповідні величини для зворотних реакцій. У рівняннях прийняті наступні позначення триацилгліцеринів: SSS – тристеарин; OOO – триолеїн; SSO – триацилгліцерин, до складу якого входять два ацили стеаринової кислоти (S) та один ацил олеїнової кислоти (O); SOO –

триацилгліцерин, до складу якого входять один ацил стеаринової кислоти та два ацили олеїнової кислоти.

Для математичного моделювання процесу ферментативної переестерифікації було складено систему нелінійних диференціальних рівнянь (4), що описують зміну концентрацій вихідних субстратів і продуктів реакцій у часі.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d[SSS]}{d\tau} &= -k_1[SSS][OOO] + k_{-1}[SSO][SOO] - k_3[SOO][SSS] + k_{-3}[SSO]^2 \\ \frac{d[SSO]}{d\tau} &= k_1[SSS][OOO] - k_{-1}[SSO][SOO] - k_2[SSO][OOO] + k_{-2}[SOO]^2 + \\ &+ 2k_3[SOO][SSS] - 2k_{-3}[SSO]^2 \\ \frac{d[SOO]}{d\tau} &= k_1[SSS][OOO] - k_{-1}[SSO][SOO] + 2k_2[SSO][OOO] - 2k_{-2}[SOO]^2 \\ &- k_3[SOO][SSS] + k_{-3}[SSO]^2 \\ \frac{d[OOO]}{d\tau} &= -k_1[SSS][OOO] + k_{-1}[SSO][SOO] - k_2[SSO][OOO] + k_{-2}[SOO]^2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Процес моделювання здійснювався в середовищі Mathcad 15 (Parametric Technology Corporation) і полягав в ідентифікації параметрів побудованої моделі з використанням методу оптимізації, у ході якої проводилася мінімізація помилок між експериментальними та модельними даними [15]. Загальну схему алгоритму представлено на рис. 1.

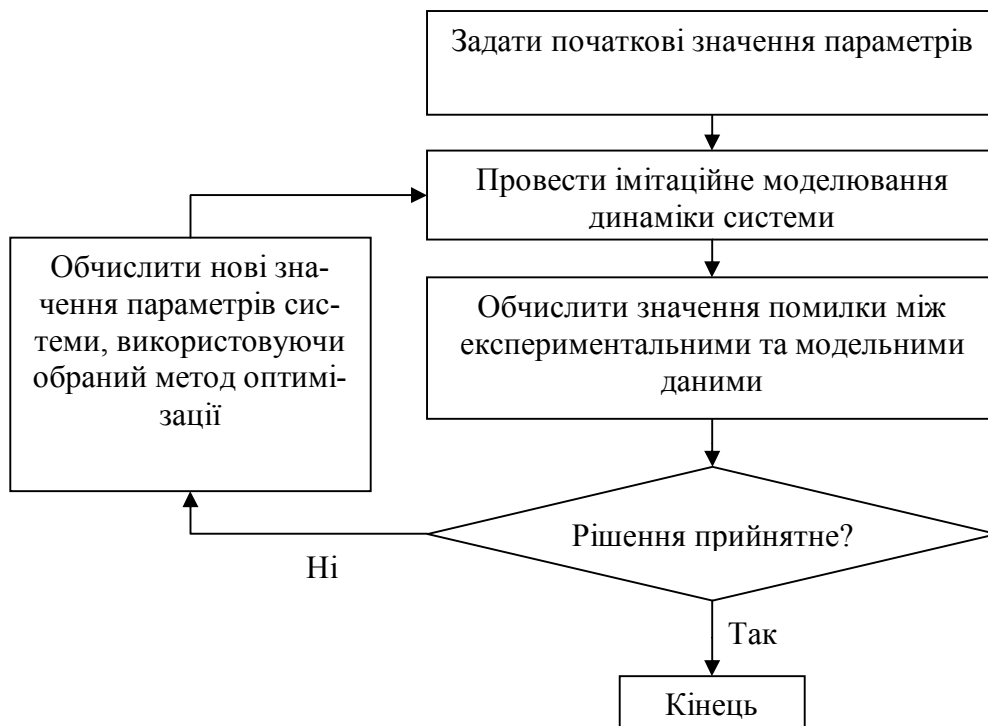


Рисунок 1 – Загальна схема алгоритму ідентифікації параметрів

У якості чисельної процедури моделювання диференціальних рівнянь було використано метод Рунге-Кутта зі змінним кроком четвертого порядку точності. Отримані за допомогою зазначеного методу дані використовувалися для обчислення цільової функції $J(k)$, яка фактично становила помилку між експериментальними та модельними даними, і мала такий вигляд:

$$J(k) = \sum_{i=0}^m \|x_i - \bar{x}(t_i, x^0, k)\|^2, \quad (5)$$

де x_i – значення вектора станів системи, отримані експериментальним шляхом у момент часу t_i ; $\bar{x}(t_i, x^0, k)$ – значення вектора станів системи, обчислені з використанням обраної процедури імітаційного моделювання в момент часу t_i з початковими умовами $x^0 = x_0 = \bar{x}(t_0, x^0, k)$; k – вектор параметрів системи; m – кількість наборів експериментальних даних.

Для оптимізації застосовувався алгоритм випадкового багатомірного пошуку – метод комплексів.

Як критерій закінчення ітерацій було використано наступну умову:

$$\frac{1}{z} \sqrt{\sum_{i=1}^z (J(k)_i - J(k)_c)^2} \leq \varepsilon, \quad (6)$$

де $J(k)_c$ – значення функції, що мінімізується, в центрі комплексу; z – кількість вершин гіперсфери; ε – точність рішення ($\varepsilon=10^{-3}$).

За допомогою програми, розробленої згідно представленому на рис. 1 алгоритму, було виконано обробку експериментальних даних і визначено чисельні значення констант швидкостей прямих і зворотних реакцій, які протікають у процесі переетерифікації триацилгліцеринів, а також їх констант рівноваги (відповідно табл. 1 та 2) при температурах 50 °C, 60 °C та 70 °C.

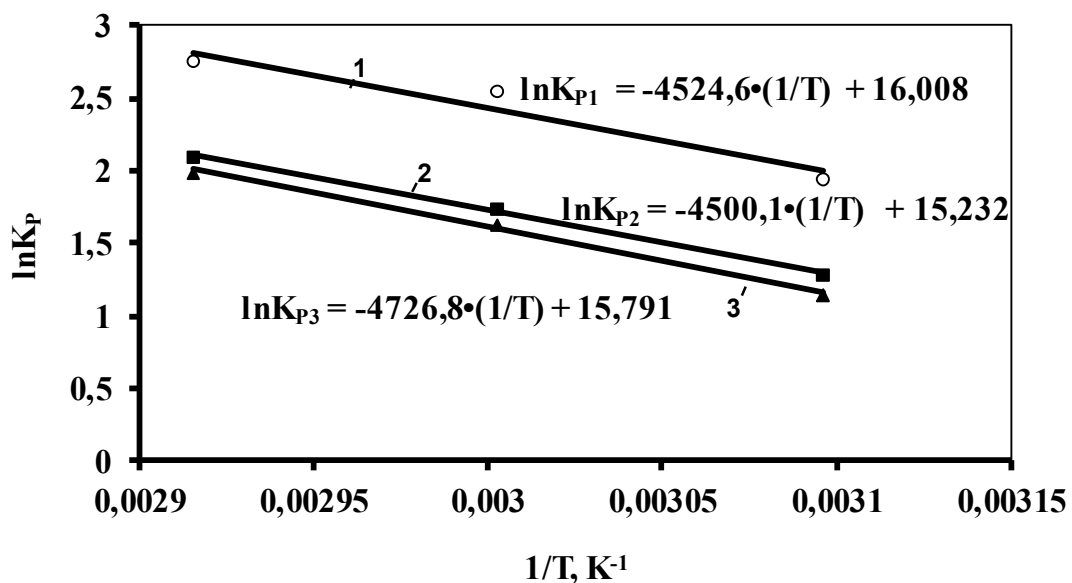
Таблиця 1 – Константи швидкостей (моль·ч⁻¹·год⁻¹)

Реакція	Значення констант швидкостей при різних температурах					
	50 °C		60 °C		70 °C	
	Пряма	Зворот-на	Пряма	Зворот-на	Пряма	Зворот-на
$SSS + OOO \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} SSO + SOO$	0,0549	0,0079	0,1124	0,0088	0,1504	0,0096
$SSO + OOO \xrightleftharpoons[k_{-2}]{k_2} 2SOO$	0,0315	0,0087	0,0584	0,0102	0,0913	0,0112
$SOO + SSS \xrightleftharpoons[k_{-3}]{k_3} 2SSO$	0,0285	0,0091	0,0535	0,0105	0,0881	0,0120

Таблиця 2 – Константи рівноваги (K_p)

Реакція	Значення констант рівноваги при різних температурах		
	50 °C	60 °C	70 °C
$SSS + OOO \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} SSO + SOO$	6,95	12,77	15,67
$SSO + OOO \xrightleftharpoons[k_{-2}]{k_2} 2SOO$	3,62	5,73	8,15
$SOO + SSS \xrightleftharpoons[k_{-3}]{k_3} 2SSO$	3,13	5,10	7,34

Дані, представлені у табл. 1 і 2, дали можливість розрахувати термодинамічні параметри реакцій переетерифікації триацилгліцеринів при вказаних температурах. Для цього в напівлогарифмічних координатах були побудовані залежності $\ln K_p = f(1/T)$ (рис. 2).



- 1 – залежність $\ln K_{p1} = f(1/T)$ для реакції $SSS + OOO \rightleftharpoons SSO + SOO$;
- 2 – залежність $\ln K_{p2} = f(1/T)$ для реакції $SSO + OOO \rightleftharpoons 2SOO$;
- 3 – залежність $\ln K_{p3} = f(1/T)$ для реакції $SOO + SSS \rightleftharpoons 2SSO$.

Рисунок 2 – Залежність логарифмів констант рівноваги від зворотних значень температури

Залежності, що приведені на рис. 2, для кожної реакції підпорядковуються рівнянням прямих ліній з відповідними кутовими коефіцієнтами. Це дозволило розрахувати термодинамічні характеристики ферментативного процесу, а саме ΔH , ΔG та ΔS .

$$\Delta H = -tg\alpha \cdot R, \quad (7)$$

де $tg\alpha$ – кутовий коефіцієнт, R – універсальна газова стала, Дж/(моль·К).

Енергію Гіббса ΔG та ентропію ΔS в інтервалі температур 50–70 °С (323–343К) визначали за формулами (8) та (9) відповідно:

$$\Delta G = -RT \ln K, \quad (8)$$

де K – константа рівноваги при відповідній температурі T .

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T}. \quad (9)$$

Величину енергії активації для прямих та зворотних реакцій в області оптимальних значень температурних режимів процесу 60–70 °С (333–343К) розраховували за формулою:

$$E_{акт} = \frac{RT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}}, \quad (10)$$

де k_{T_1} та k_{T_2} – константи швидкості при температурах T_1 та T_2 .

Чисельні значення термодинамічних характеристик досліджуваних реакцій та їх енергій активацій представлено в табл. 3 та 4 відповідно.

Таблиця 3 – Термодинамічні характеристики

Реакція	ΔH , кДж/ моль	ΔG , кДж/моль			ΔS , кДж/(моль·К)		
		50 °С	60 °С	70 °С	50 °С	60 °С	70 °С
$SSS + OOO \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} SSO + SOO$	37,62	-5,21	-7,05	-7,85	0,13	0,13	0,13
$SSO + OOO \xrightleftharpoons[k_{-2}]{k_2} 2SOO$	37,42	-3,45	-4,83	-5,98	0,13	0,13	0,13
$SOO + SSS \xrightleftharpoons[k_{-3}]{k_3} 2SSO$	25,80	-3,06	-4,51	-5,68	0,09	0,09	0,09

Аналіз даних, наведених в табл. 3 і 4, дозволяє зробити висновок, що усі реакції є ендотермічними, тобто протікають із поглинанням тепла. Про це свідчать позитивні значення теплового ефекту ΔH і перевага чисельних значень енергії активації в прямому напрямку над відповідними величинами для зворотних. Зі зростанням температури для приведених реакцій значення ΔG зменшується, тобто тим переважніше реакції йдуть у бік утворення продуктів. Крім того, друга і третя реакції більш утрудненні у зрівнянні з першою, оскільки при всіх температурах спостерігається наступне співвідношення $\Delta G_1 < \Delta G_2 < \Delta G_3$.

Таблиця 4– Енергія активації (кДж/моль)

Реакція	Пряма	Зворотна
$SSS + OOO \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} SSO + SOO$	27,66	8,26
$SSO + OOO \xrightleftharpoons[k_{-2}]{k_2} 2SOO$	42,43	8,88
$SOO + SSS \xrightleftharpoons[k_{-3}]{k_3} 2SSO$	47,37	12,68

Висновки

1. Розроблено математичну модель та встановлено основні закономірності кінетики ферментативної переестерифікації триацилгліцеринів під дією ферментного препарату Novozym 40086.
2. Визначено константи швидкостей прямих і зворотних реакцій, що протікають у реакційних системах, а також константи рівноваги кожної з них.
3. На основі отриманих даних розраховано термодинамічні параметри та зроблено висновки про внесок кожної з реакцій в загальний процес у цілому.
4. Отримані результати слугуватимуть науковим підґрунтям для встановлення технологічних параметрів виробництва жирових систем з мінімальним вмістом транс-ізомерів.

Література

1. Shahidi F. Bailey's Industrial Oil and Fat Products, 6th Edition / F. Shahidi. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2005. – 3616 pp.
2. Dijkstra A.J. Trans fatty acids / A.J. Dijkstra, R. J. Hamilton, W. Hamm. – Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, 2008. – 256 pp.
3. Booker C.S. Trans fatty acids and cardiovascular health: Translation of the evidence base / C. S. Booker, J. I. Mann // Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases. – 2008. – Vol. 18. – №6. – P. 448–456.
4. Kavanagh K. Neonatal and fetal exposure to trans–fatty acids retards early growth and adiposity while adversely affecting glucose in mice / K. Kavanagh, S. Sajadian, K. A. Jenkins // Nutrition Research. – 2010. – Vol. 30. – №6. – P. 418–426.
5. Phivilay A. High dietary consumption of trans fatty acids decreases brain docosahexaenoic acid but does not alter amyloid–[beta] and tau pathologies in the 3xTg–AD model of Alzheimer's disease / A. Phivilay, C. Julien, C. Tremblay // Neuroscience. – 2009. – Vol. 159. – №1. – P. 296–307.
6. Kummerow F. A. Trans fatty acids in hydrogenated fat inhibited the synthesis of the polyunsaturated fatty acids in the phospholipid of arterial / F. A. Kummerow, Q. Zhou, M. M. Mahfouz // Life Sciences. – 2004. – Vol. 74. – Issue 22. – P. 2707–2723.

7. Youngjoo Kwon. Effect of trans-fatty acids on lipid metabolism: Mechanisms for their adverse health effects / Kwon Youngjoo // Food Reviews International. – 2016. – Vol. 32. – Issue 3. – P. 323–339.
8. O'Brien R.D. Fat and oils: formulating and processing for applications, 3rd ed./ R. D. O'Brien. – Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2009. – 745 pp.
9. Casas A. Catalyst removal after the chemical interesterification of sunflower oil with methyl acetate / A. Casas, Á. Pérez, M. Ramos // Organic Process Research & Development. – 2017. – Vol. 21. – No. 9. – P. 1253–1258.
10. Holm H. The evolution of enzymatic interesterification in the oils and fats industry / Holm H., Cowan D. // European Journal Of Lipid Science And Technology. – 2008. – Vol. 110. – No. 8. – P. 679–691.
11. Sikorski Z. E. Chemical, biological and functional properties of food lipids / Z. E. Sikorski, A. Kolakowska. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 512 pp.
12. Moffatt R. J. Lipid metabolism and health (1st ed.) / R. J. Moffatt, B. A. Stamford. – Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006. – 366 pp.
13. Akoh C.C. Food lipids: chemistry, nutrition, and biotechnology (4th ed.) / C. C. Akoh. – Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2017. – 1029 pp.
14. ISO/TS 17383:2014. Determination of the triacylglycerol composition of fats and oils – Determination by capillary gas chromatography. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2014. – 13 pp.
15. Korobov V. Chemical kinetics with Mathcad and Maple / Korobov V., Ochkov V. – Springer-Verlag Wien, 2011. – 344 p.

Bibliography (transliterated)

1. Shahidi F. Bailey's Industrial Oil and Fat Products, 6th Edition / F. Shahidi. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2005. – 3616 pp.
2. Dijkstra A.J. Trans fatty acids / A.J. Dijkstra, R. J. Hamilton, W. Hamm. – Blackwell Publishing Ltd, Oxford, UK, 2008. – 256 pp.
3. Booker C.S. Trans fatty acids and cardiovascular health: Translation of the evidence base / C. S. Booker, J. I. Mann // Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases. – 2008. – Vol. 18. – №6. – P. 448–456.
4. Kavanagh K. Neonatal and fetal exposure to trans-fatty acids retards early growth and adiposity while adversely affecting glucose in mice / K. Kavanagh, S. Sajadian, K. A. Jenkins // Nutrition Research. – 2010. – Vol. 30. – №6. – P. 418–426.
5. Phivilay A. High dietary consumption of trans fatty acids decreases brain docosahexaenoic acid but does not alter amyloid- β and tau pathologies in the 3xTg-AD model of Alzheimer's disease / A. Phivilay, C. Julien, C. Tremblay // Neuroscience. – 2009. – Vol. 159. – №1. – P. 296–307.
6. Kummerow F.A. Trans fatty acids in hydrogenated fat inhibited the synthesis of the polyunsaturated fatty acids in the phospholipid of arterial / F. A. Kummerow, Q. Zhou, M. M. Mahfouz // Life Sciences. – 2004. – Vol. 74. – Issue 22. – P. 2707–2723.

7. Youngjoo Kwon. Effect of trans-fatty acids on lipid metabolism: Mechanisms for their adverse health effects / Kwon Youngjoo // Food Reviews International. – 2016. – Vol. 32. – Issue 3. – P. 323–339.
8. O'Brien R. D. Fat and oils: formulating and processing for applications, 3rd ed./ R. D. O'Brien. – Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, 2009. – 745 pp.
9. Casas A. Catalyst removal after the chemical interesterification of sunflower oil with methyl acetate / A. Casas, Á. Pérez, M. Ramos // Organic Process Research & Development. – 2017. – Vol. 21. – No. 9. – P. 1253-1258.
10. Holm H. The evolution of enzymatic interesterification in the oils and fats industry / Holm H., Cowan D. // European Journal Of Lipid Science And Technology. – 2008. – Vol. 110. – No. 8. – P. 679-691.
11. Sikorski Z. E. Chemical, biological and functional properties of food lipids / Z. E. Sikorski, A. Kolakowska. – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2011. – 512 pp.
12. Moffatt R. J. Lipid metabolism and health (1st ed.) / R. J. Moffatt, B. A. Stamford. – Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, 2006. – 366 pp.
13. Akoh C.C. Food lipids: chemistry, nutrition, and biotechnology (4th ed.) / C. C. Akoh. – Boca Raton: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2017. – 1029 pp.
14. ISO/TS 17383:2014. Determination of the triacylglycerol composition of fats and oils - Determination by capillary gas chromatography. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2014. – 13 pp.
15. Korobov V. Chemical kinetics with Mathcad and Maple / Korobov V., Ochkov V. – Springer-Verlag Wien, 2011. – 344 p.

УДК 665:664.3

Некрасов П.О., Гудзь О.М., Руднева С.І., Некрасов О.П.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

КІНЕТИКА І ТЕРМОДИНАМІКА ФЕРМЕНТАТИВНОГО ПРОЦЕСУ ВИРОБНИЦТВА ЖИРОВИХ СИСТЕМ З МІНІМАЛЬНИМ ВМІСТОМ ТРАНС-ІЗОМЕРІВ

В роботі виконано математичне моделювання кінетики ферментативної переестерифікації триацилгліцеринів під дією ферментного препарату Novozym 40086 («Novozymes», Данія). Визначено константи швидкостей прямих і зворотних реакцій, а також їх константи рівноваги. Розраховано термодинамічні параметри і зроблено висновок про внесок кожної з реакцій у загальний процес. Отримані результати є основою для визначення технологічних параметрів виробництва жиркових систем з мінімальним вмістом транс-ізомерів.

Ключові слова: переестерифікація, ліпаза, математичне моделювання, метод комплексів, газорідинна хроматографія.

УДК 665:664.3

Некрасов П.А., Гудзь О.Н., Руднева С.І., Некрасов А.П.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,

**КИНЕТИКА И ТЕРМОДИНАМИКА ФЕРМЕНТАТИВНОГО ПРОЦЕССА
ПРОИЗВОДСТВА ЖИРОВЫХ СИСТЕМ С МИНИМАЛЬНЫМ СОДЕРЖАНИЕМ
ТРАНС-ИЗОМЕРОВ**

В работе выполнено математическое моделирование кинетики ферментативной переэтерификации триацилглицеринов под действием ферментного препарата Novozym 40086 («Novozymes», Дания). Определены константы скоростей прямых и обратных реакций, а также их константы равновесия. Рассчитаны термодинамические параметры и сделан вывод о вкладе каждой из реакций в общий процесс. Полученные результаты являются основой для определения технологических параметров производства жировых систем с минимальным содержанием транс-изомеров.

Ключевые слова: переэтерификация, липаза, математическое моделирование, метод комплексов, газожидкостная хроматография.

Nekrasov P.O., Gudz O.M., Rudneva S.I., Nekrasov O.P.

**KINETICS AND THERMODYNAMICS OF THE ENZYMATIC PROCESS OF
PRODUCTION OF FATTY SYSTEMS WITH MINIMUM TRANS-ISOMERS
CONTENT**

Mathematical modeling of the kinetics of the enzymatic interesterification of triacylglycerols under the action of the enzyme preparation Novozym 40086 (Novozymes, Denmark) has been performed in the work. The rate constants of direct and inverse reactions, as well as their equilibrium constants, have been determined. Thermodynamic parameters have been calculated and a conclusion has been made on the contribution of each of the reactions to the overall process. The results obtained are the basis for determining the technological parameters of the production of fatty systems with a minimum content of trans-isomers.

Key words: interesterification, lipase, mathematical modeling, method of complexes, gas-liquid chromatography.

УДК 004.942: 004.023:519.85

Тесленко М.Г., аспірант, Пермяков В.І., професор

Харківський національний університет будівництва та архітектури

АНАЛІЗ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДУ ВИМІРЮВАННЯ КУТА ЗМОЧУВАННЯ ЗА ЗОБРАЖЕННЯМ ШЛЯХОМ ДОСЛІДЖЕННЯ ОБУМОВЛЕНОСТІ ЗАДАЧІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЕКЦІЇ КРАПЛІ

Ключові слова: крайовий кут змочування, математичне моделювання, число обумовленості, багатомірна оптимізація, метод Хука-Дживса.

Вступ. Змочування є важливою характеристикою матеріалів, що впливає на різні технологічні процеси. Змочування використовується для оцінки властивостей різноманітних матеріалів, зокрема полімерів[1], [3]. Основною величиною, що характеризує змочуваність є рівноважний крайовий кут[12]. У ході попередніх досліджень [13],[15] було розроблено алгоритм визначення крайового кута змочування, який застосовано у програмі [6]. При цьому необхідно провести аналіз роботи алгоритму для оцінки можливості його використання при реальних дослідженнях. Основна задача при роботі алгоритму є забезпечення високої точності вимірювань. У попередніх роботах[14] було показано необхідність більш детального дослідження роботи алгоритму із метою зменшення похибки вимірювань.

У основу методу визначення крайового кута змочування покладено алгоритм апроксимації моделі контуру краплі на поверхні із використанням точок на контурі краплі у якості вихідних даних. У основу моделі покладено базові функції еліпсу та прямої. Рівняння еліпсу використовується у вигляді рівняння кривої другого порядку:

$$a_1x^2 + a_2y^2 + 2a_3xy + 2a_4x + 2a_5y = -1. \quad (1)$$

Для відтворення параметрів використовується метод найменших квадратів[8]. При цьому знаходяться оптимальне рішення перевантаженої системи рівнянь, що складається із коефіцієнтів базових функцій. Рішення знаходиться у вигляді:

$$O = A^+ B, \quad (2)$$

$$A^+ = (A^T A)^{-1} A^T, \quad (3)$$

де A^+ – псевдозворотня матриця[2] коефіцієнтів лівої частини системи, що складається з рівнянь виду (1), B – матриця коефіцієнтів правої частини:

$$A = \begin{pmatrix} x_1^2 & y_1^2 & 2x_1y_1 & 2x_1 & 2y_1 \\ x_2^2 & y_2^2 & 2x_2y_2 & 2x_2 & 2y_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_k^2 & y_k^2 & 2x_ky_k & 2x_k & 2y_k \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ \dots \\ -1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де k відповідає кількості точок, що використовуються у якості вихідних даних. При цьому похибку лінійного рівняння можна визначити наступним чином:

$$A(x + \Delta x) = b + \Delta b, \quad (5)$$

де A – матриця коефіцієнтів, b – вектор вільних членів, Δb – прирощення вектору b (похибка даних), x – вектор рішень, Δx – поправка на Δb . Похибка вихідних даних для одної координати $M(x_e, y_e)$ може бути представлена у вигляді:

$$\delta = |y_e - y_r|, \quad (6)$$

де y_e – задане значення координати точки на контурі краплі по вісі ординат, y_r – таке значення координати, що відповідає реальному положенню контуру для x_e .

Мета роботи. Метою даного дослідження є оцінка точності роботи алгоритму, визначення оптимальних параметрів, умов та обмежень вихідних даних. У основу дослідження покладено визначення числа обумовленості задачі із різними початковими умовами. Результати роботи дозволять оцінити ефективність методу, визначити межі його застосування, а також виявити слабкі місця. У результаті дослідження планується оцінити обумовленість задачі для всієї області значень вихідних даних, встановити оптимальну з точки зору мінімізації похибки та швидкості вимірювання кількість точок та параметри їх розташування.

Основна частина. Значення похибки залежить від умов використання алгоритму, що у даному дослідженні не розглядається. Але можливо модифікувати алгоритм із урахуванням таких умов, що дозволять знизити вплив похибки вихідних даних на результати вимірювань.

Для оцінки такого впливу можна використати число обумовленості. Число обумовленості визначається як коефіцієнт при співвідношенні відносних похибок вектору вільних членів та вектору рішень, де відносна похибка визначається як співвідношення абсолютної похибки (норми різниці між точним та приблизним векторами) до норми вектору[4]:

$$\frac{\|\Delta x\|}{\|x\|} = \|A\| \|A^{-1}\| \frac{\|\Delta b\|}{\|b\|}, \quad (7)$$

де $\|\cdot\|$ – деяка векторна норма, $\|A\| \|A^{-1}\|$ – міра обумовленості. У [4] також показано, що число обумовленості є коефіцієнтом росту відносних похибок при неточному завданні коефіцієнтів матриці A . Іншими словами, чим більше число обумовленості, тим нижча точність обчислень може бути забезпечена. За попередніми дослідженнями задачі було виявлено, що різні числа обумовленості показують схожу картину. Також, важливим є не встановлення абсолютного значення, а визначення залежності між параметрами алгоритму та числом обумовленості. Враховуючи це, у даному дослідженні буде використовуватися число обумовленості. Тоді як більш зручне для проведення розрахунків:

$$Q = \frac{\max |\lambda_i|}{\min |\lambda_i|}, \quad (8)$$

де λ_i – власні числа матриці A . При використанні алгоритму важливою є кількість точок, що використовуються у якості вихідних даних. Інтуїтивно, збільшення кількості точок має призвести до зменшення похибки, але одночасно буде зростати час на проведення вимірювання. Тому слід визначити оптимальну кількість точок, при якій обумовленість буде достатньо високою. Також можна встановити оптимальне з точки зору підвищення обумовленості розташування точок на по вісі абсцис.

Залежність обумовленості задачі від параметрів алгоритму невідома. Для проведення дослідження необхідно мати можливість використовувати велику кількість вихідних даних – масивів точок контуру краплі із точно встановленими параметрами розміру та крайового кута. Для цього будується модель краплі на поверхні, що задовольняє умовам роботи алгоритму.

Модель краплі на поверхні. У основу методу покладено модель зображення краплі на поверхні на базі функцій еліпсу, що відповідає лінії контакту рідина-газ, та прямої, що відповідає лінії контакту рідина-тверде тіло. Основною задачею є отримання залежності крайового кута, що визначається як кут нахилу дотичної у точці трифазного контакту (на перетині еліпсу та прямої) [12]. Модель має відповідати особливостям реальних зображень краплі на поверхні та охоплювати весь можливий діапазон змін суттєвих параметрів (розмір, нахил та значення крайового кута).

Модель має описувати такі функції, що відповідатимуть контуру краплі із параметрично заданим значенням крайового кута. Також вона має бути зручною для реалізації у вигляді алгоритму із отриманням масиву вихідних значень координат.

Якщо велика та мала напівосі базового еліпсу відомі і дорівнюють a та b відповідно, ордината точки трифазного контакту для деякого крайового кута θ визначається за формулою:

$$sy = \frac{b^2}{\sqrt{a^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi\theta}{180}\right)^2 + b^2}}. \quad (9)$$

При значенні крайового кута більше 90° , значення sy змінює знак. Якщо відомо значення зсуву sy по вісі ординат, абсцису точки трифазного контакту можна визначити за формулою:

$$sx = a \sqrt{1 - \left(\frac{sy}{b}\right)^2}. \quad (10)$$

Із урахуванням отриманих значень точки трифазного контакту, визначаються полярні кути для цих точок:

$$\varphi^{c1} = \operatorname{arctg}\left(\frac{sy * a}{sx * b}\right), \varphi^{c2} = \pi - \varphi^{c1}. \quad (11)$$

Використовуючи ці значення можна розрахувати точки для частини еліпсу, що використовуватиметься у моделі у полярній системі координат:

$$\varphi(n) = \varphi^{c1} + \frac{\varphi^{c2} - \varphi^{c1}}{N}(n-1), n \in \{1 \dots N\}. \quad (12)$$

Із урахуванням полярного кута, Декартові координати точок еліпсу:

$$x = a \cos(\varphi), y = b \sin(\varphi) - sy. \quad (13)$$

У якості прямої (рідина-тверде тіло) розглядається вісь абсцис у декартовій системі координат. Для зміни крайового кута змочування передбачається зміщення еліпсу по вісі ординат із збереженням геометричних співвідношень базового еліпсу. Формула (13) описує множину точок еліпсу, що відповідає умовам цифрового зображення та може бути використано для його побудови. Початкове значення ординати точки трифазного контакту відповідає нулю. Значення крайового кута обчислюється через тангенс кута нахилу дотичної у точці трифазного контакту sy, sx :

$$\operatorname{tg} \theta(sy, sx) = \frac{b^2 sx}{a^2 sy}. \quad (14)$$

Враховуючи те, що кут змочування може приймати значення від 0° до 180° , формула визначення крайового кута має вигляд:

$$\theta = \begin{cases} \frac{180(\pi + \arctg(\operatorname{tg} \theta(sx, sy)))}{\pi}, & \operatorname{tg} \theta(sx, sy) < 0 \\ \frac{180(\arctg(\operatorname{tg} \theta(sx, sy)))}{\pi}, & \operatorname{tg} \theta(sx, sy) \geq 0 \end{cases}. \quad (15)$$

Таким чином, модель дозволяє визначати крайовий кут змочування на зображенні за умови, що величина зсуву еліпсу та розміри його напіввісей є відомими. Для відповідності реальному зображенню, модель має бути інваріантною до зсуву і повороту вісі координат. Поворот зображення (у декартових координатах) виконується за формулою:

$$x' = x \cos(\psi) - y \sin(\psi), y' = y \cos(\psi) + x \sin(\psi). \quad (16)$$

Похідна у точці трифазного контакту з урахуванням повороту зображення буде знаходитися за формулою:

$$\operatorname{tg} \theta(sy, sx) = \frac{a^2 (y' \cos(\psi) - x' \sin(\psi) + sy) - b^2 (x' \cos(\psi) + y' \sin(\psi)) \cos(\psi)}{a^2 (y' \cos(\psi) - x' \sin(\psi) + sy) \cos(\psi) + b^2 (x' \cos(\psi) + y' \sin(\psi)) \sin(\psi)}. \quad (17)$$

Використовуючи дану модель, можна провести дослідження обумовленості алгоритму. Для проведення аналізу у модель вноситься штучна похибка у значення кож-

ної ординати, що відповідає реальній похибці при встановленні координат точок на контурі краплі:

$$y_i^* = y_i' + P_N(\mu, \sigma); \mu = 0, \quad (18)$$

де $P_N(\mu, \sigma)$ – нормальний закон розподілу, μ – математичне очікування, σ – середньоквадратичне відхилення. Зображення, отримане на базі моделі показано на рис. 1.

Для дослідження використовувалися моделі зображення із різним значенням кута змочування, що охоплюють весь діапазон можливих значень. На базі моделі краплі було створено функцію, яка повертає координати контуру краплі відповідно до заданих параметрів розміру, куту змочування, рівню похибки.

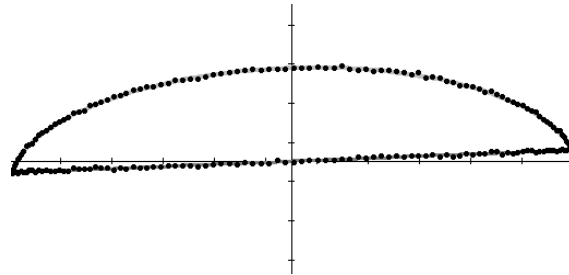


Рисунок 1 – Зображення із крайовим кутом 75° , отримане за допомогою моделі.
Точками показано вихідні дані із штучно встановленою похибкою

Дослідження обумовленості. Друга частина алгоритму дозволяє визначити число обумовленості для вихідної краплі. Таким чином було експериментально отримано залежність між кутом змочування та числом обумовленості, яку представлено на рис. 2.

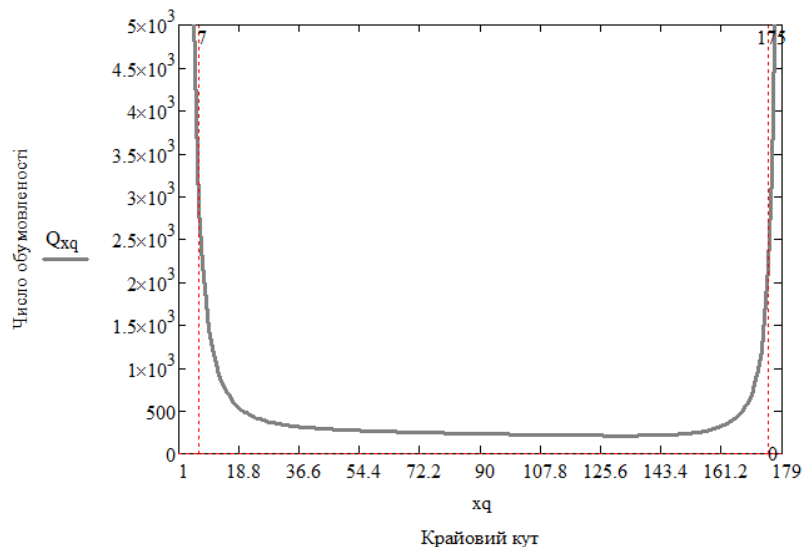


Рисунок 2 – Число обумовленості залежно від крайового кута

Мале значення числа обумовленості свідчить про високу надійність алгоритму. Виходячи із даних, отриманих у результаті дослідження, можна зробити висновок, що обумовленість задачі залежить від значення кута змочування. При проведенні вимірювань на зображеннях із граничними значеннями кута змочування ефективність алгорит-

му значно зменшується, тому його використання при значенні крайового кута змочування менше 5° та більше 177° недоцільним.

Для визначення оптимальної кількості точок розглядались лише кути більше 5° . Задачею у даному випадку є встановлення оптимальної кількості точок m при мінімізації числа обумовленості для множини точок

$$M = \{m \in \mathbb{N} \mid 5 \leq m \leq 20\}, \quad (19)$$

де $\mathbb{N}$ – множина натуральних чисел. Обмеження кількості точок знизу відповідає мінімальній кількості вихідних даних, необхідних для роботи алгоритму, зверху – значенням, що обмежує раціональне використання методу при проведенні реальних досліджень. Вирішувати задачу слід окремо для кожного значення кута змочування. Для достовірності результатів і зменшення впливу розташування координат точок, слід повторити експеримент із різними координатами точок. Задача має однозначне рішення та може бути розв'язана алгоритмічно. Для кожного значення m було отримано відповідне значення числа обумовленості. На рис. 3 відображено графік для отриманих значень для кутів 75° та 130° .

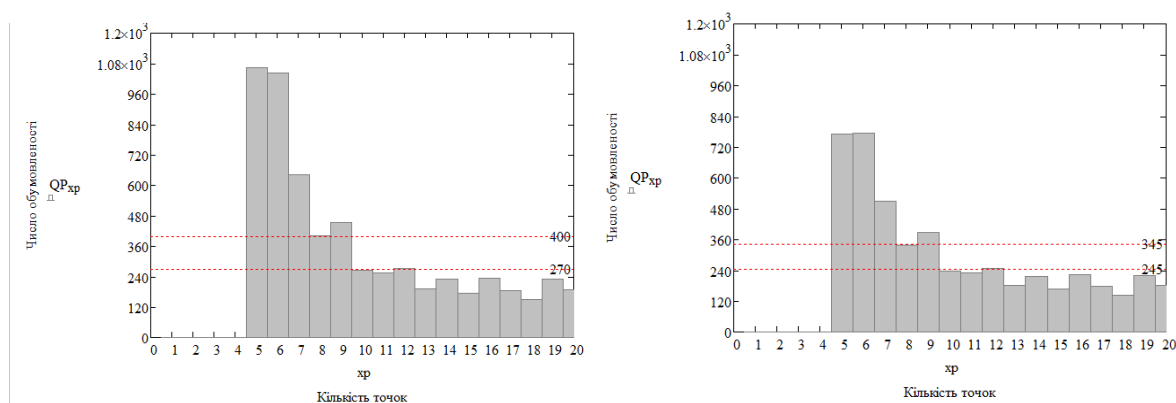


Рисунок 3 – Графіки залежності числа обумовленості від кількості точок, ліворуч – для крайового кута 75° , праворуч – 130°

За отриманими результатами можна зробити висновки про вплив кількості точок на обумовленість задачі. При використанні мінімальної можливої кількості точок число обумовленості різко зростає, що свідчить про підвищення чутливості алгоритму до похибки вихідних даних. Використання семи точок дозволяє зменшити значення числа обумовленості більше ніж на 30 %. Додавання ще одної точки (восьмої) може зменшити число обумовленості ще на 25–30 %. Використання більше 10 точок не є доцільним, адже поліпшення обумовленості є достатньо малим. Таким чином можна зробити висновок, що для забезпечення високої точності вимірювань слід використовувати 8–10 точок. Використання семи точок також може бути задовільним при необхідності зменшення часу проведення вимірювань, особливо при дослідженні матеріалів із достатньо великим значенням крайового кута.

Визначення оптимального положення точок. При встановленні точок їх координати по вісі абсцис можуть мати будь-яке значення. Але при проведенні дослідження обумовленості було визначено, що різні положення точок впливають на обумовленість задачі. Це означає, що може існувати деяке оптимальне розташування точок, при якому

вплив похибки (6) буде мінімальним, що призведе до підвищення точності роботи алгоритму.

Ця задача також зводиться до мінімізації числа обумовленості. При цьому необхідно дослідити усі можливі положення точок за умови, що вони є незалежними одна від одної. Таким чином, цільова функція приймає вигляд:

$$f(x_1^*, x_2^*, \dots, x_m^*) \rightarrow \min_{x \in X} f(x_1, x_2, \dots, x_m), X = \{x \in R \mid x_{\min} \leq x \leq x_{\max}\}, \quad (20)$$

де m – кількість точок вихідних даних, R – множина дійсних чисел, $x_{\min}$ – координата контуру краплі по вісі абсцис із мінімальним значенням (перша точка перетину еліпсу та прямої), $x_{\max}$ – друга точка перетину. На реальному зображенні множина залежить від розподільчої здатності та площі, що займає крапля. При цьому встановлення точок із скільки завгодно високою точністю по вісі абсцис при проведенні реальних досліджень неможливе, можна лише визначити приблизні діапазони. Для проведення дослідження оптимального розташування точок достатньо використати сто точок із приращенням $\Delta x = 1$. Для зручності розрахунків підрахунок буде починатися із точки $x_{\min} = 0$, $x_{\max} = 100$.

Для вирішення задачі необхідно використати один із методів багатомірної оптимізації. При цьому задача характеризується відсутністю аналітичного опису цільової функції. Визначення функції у аналітичній формі не є доцільним, адже можуть бути визначені її дискретні значення. Це звужує кількість методів, що можуть бути застосовані для рішення задачі оптимізації.

Враховуючи вже розроблені алгоритми для отримання моделі краплі (множини точок), доцільно використовувати ітеративний алгоритм. Одним з найбільш простих методом є метод послідовних наближень, але він не є ефективним для рішення багато параметричних задач оптимізації. Ефективним методом для рішення таких задач є ітеративний метод Хука-Дживса [7]. На першому етапі алгоритму виконується пошук для одного з параметрів, а інші «заморожуються». Процедура виконується доки досягається зменшення критерію оптимальності – числа обумовленості, що розраховується відповідно до значень вхідних параметрів на кожній ітерації алгоритму. Коли буде досягнуто оптимальне значення для одного критерія, виконується така ж операція для наступного. Особливістю роботи алгоритму є зміна шагу у ході роботи. Алгоритм починає роботу із найбільшим можливим значенням шагу, знаходить оптимальне значення із цим шагом, після чого шаг змінюється на встановлене значення і процес повторюється. Умовою припинення роботи алгоритму є досягнення оптимального значення (мінімуму числа обумовленості) при мінімальному значенні шагу. Таким чином, алгоритм дозволяє розглядати систему, що досліджується, з різним масштабом. При досягненні зменшення цільової функції виконується пошук за зазком. Це дозволяє знаходити однозначне рішення, якщо воно існує, при мінімальній кількості ітерацій.

При використанні алгоритму вдалося отримати однозначне рішення задачі обумовленості. По суті, задача була вирішена дев'ять разів, для кутів 10° , 20° , 40° , 60° , 80° , 100° , 120° , 140° , 160° . Кути менше 10° не розглядалися відповідно до результатів аналізу обумовленості. Враховуючи результати, отримані при аналіз залежності числа обумовленості від кількості точок, експеримент було проведено для кількості точок 6, 7, 8, 12.

Для кожного набору точок можна було прослідити закономірність їх розташування. Точки у довільній послідовності розташовувались у п'яти діапазонах, незалежно

від їх кількості. Ці діапазони розташовуються приблизно через 25 % від діаметру краплі. Враховуючи схожість отриманих результатів, можна зробити висновок, що оптимальне розташування точок є інваріантним до їх кількості. Тому отримані дані можна розглядати як єдину вибірку.

Для більш точної оцінки діапазонів розташування точок, було використано гістограму для отриманої вибірки. Гістограма дозволяє оцінити частоту появи у вибірці деякого значення. Результат показано на рис. 4.

Отримані результати аналізу підтверджують наявність п'яти діапазонів, а також відсутність впливу кількості точок на їх оптимальне розташування. На графіку чітко відстежуються отримані діапазони. Розташування точок у їх межах забезпечить мінімальний вплив похибки вихідних даних δ (6) на результати вимірювань.

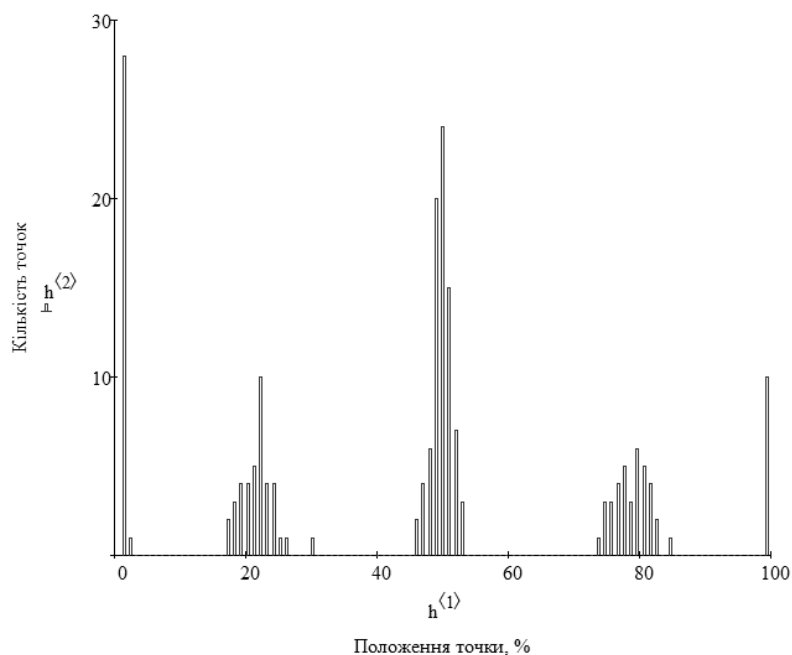


Рисунок 4 – Гістограма оптимального розташування точок

Висновки. Дослідження обумовленості задачі алгоритму визначення крайового кута залежно від його значення дозволило оцінити межі допустимих значень кута змочування при проведенні вимірювань. Так, було визначено значне збільшення похибки при наближенні до граничних (мінімальних та максимальних) значень кута змочування. Ця інформація дозволяє зменшення вірогідності отримання недостовірних результатів.

Визначення оптимальної кількості точок дозволяє використовувати алгоритм найбільш ефективно та уникнути недоцільного збільшення часу проведення вимірювань. Було отримано діапазон оптимальної кількості вихідних даних, при якому досягається оптимальне співвідношення точності та часу проведення вимірювання, що відповідає 8–10 точкам.

Отримання оптимального розташування точок, що відображено на рис. 4, дозволяє підвищити точність та встановити чіткі параметри використання алгоритму. Було виявлено п'ять діапазонів для розташування точок на контурі краплі, при чому мінімізується вплив похибки вихідних даних на результати вимірювань. У подальшому це може бути використано як при встановленні координат точок вручну, так і при розробці автоматичного алгоритму визначення положення точок. Закономірності було підтвер-

рджено для усього доцільного для використання діапазону параметрів роботи алгоритму.

Література

1. Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko, V. Permiakov, E. Rybka, R. Melshchenko, A. Kosse / Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.1 Is.12(91), 2018. – p. 9–17.
2. Алберт А., пер. с англ. Р. Ш. Липцер – Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание. – М: Наука, 1977. – 224 с.
3. Богданова Ю.Г., Долженикова В.Д., Цветкова Д.С., Карзов И.М., Алентьев А.Ю. Краевые углы смачивания как индикаторы структуры поверхностей полимеров // Журнал структурной химии. – 2011. – Т. 52, № 6. – с. 1224–1231.
4. Вержибицкий В.М. Численные методы (линейная алгебра и нелинейные уравнения), – М.: Высшая школа, 2000. – 266 с.
5. Годунов С.К. Решение систем линейных уравнений, – Новосибирск: Наука, 1980. – 177 с.
6. Комп'ютерна програма «Least Square Wetting Analyzer», Свідотство про реєстрацію авторського праву на твір № 74279 від 19.10.2017.
7. Кононюк А.Е. Основы теории оптимизации. безусловная оптимизация, – Киев: «Освіта України», 2011. – 544 с.
8. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений, – М: ФИЗМАТГИЗ, 1958. – 336 с.
9. Самарский А. А., Гулин А. В., Численные методы, – М.: Наука, 1989. – 432 с.
10. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Дрофа, 2006. – 175 с.
11. Стренг Г., Линейная алгебра и ее применения, – М.: Мир, 1980. – 454 с.
12. Сумм Б.Д. Физико-химические основы смачивания. – М.: Химия, 1976. – 232с.
13. Тесленко М. Г. Измерение угла смачивания по изображению // Науковий вісник будівництва, – 2015. – №1(79), с. 241–244.
14. Тесленко М.Г., Пермяков В.И. Определение оптимального расположения точек при вычислении угла смачивания по изображению//V Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки». Праці конференції. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2016. – с.173–175.
15. Тесленко М.Г., Пермяков В.И. Приборы для измерения угла смачивания// IV Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки». Праці IV міжнародної науково-практичної конференції. – Чернівці: Видавничий дім «Родовід», 2015. – с. 198–200.

Bibliography (transliterated)

1. Yu. Danchenko, V. Andronov, M. Teslenko, V. Permiakov, E. Rybka, R. Melshchenko, A. Kosse / Study of the free surface energy of epoxy composites using an automated measurement system// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol.1 Is.12(91), 2018. – p. 9–17.
2. Albert. A, per. S angl. R.sh.Lipster Regressiya, psevdoinversiya I rekurrentnoe ot-senivanie. M:Nauka,1977.224 p.

3. Bogdanove Yu.G., Dolzhnukova V.D., Tsvetkova D.S., Karzov I.M, Alentev A.Yu. Kraevyie uglyi smachivaniya kak indykatoryi strukturyi poverhnostey polimerov//Zhurnal strukturnoy himii.2011.T.52, #6. P. 1224–1231.
4. Verzhbitskiy V.M. Chislennyye metodyi (lineynaya algebra i nelineynyye uravneniya), – M.: Vysshaya shkola, 2000. – 266 p.
5. Godunov S.K. Reshenie sistem lineynykh uravneniy, – Novosibirsk: Nauka, 1980. – 177 p.
6. Komp'yuterna programa «Least Square Wetting Analyzer», Svidotstvo pro reestratsiyu avtorskogo pravu na tvir # 74279 vid 19.10.2017.
7. Kononyuk A.E. Osnovy teorii optimizatsii. bezuslovnaya optimizatsiya, – Kiev: «Osvita Ukrainy», 2011. – 544 s.p
8. Linnik Yu.V. Metod naimenshih kvadratov i osnovy matematiko-statisticheskoy teorii obrabotki nablyudeniy, – M: FIZMATGIZ, 1958. – 336 p.
9. Samarskiy A.A., Gulin A.V. Chislennyye metodyi, – M.: Nauka, 1989. – 432 p.
10. Sobol I.M. Vyibor optimalnykh parametrov v zadachah so mnogimi kriteriyami. – M.: Drofa, 2006. – 175 p.
11. Streng G. Lineynaya algebra i ee primeneniya, – M.: Mir, 1980. – 454 p.
12. Summ B.D. Fiziko-himicheskie osnovy smachivaniya.– M.: Himiya, 1976.– 232p.
13. Teslenko M.G. Izmerenie ugla smachivaniya po izobrazheniyu // Naukoviy visnik budivnitstva. – 2015. – #1(79), p. 241–244.
14. Teslenko M.G., Permyakov V.I. Opredelenie optimalnogo raspolzheniya tochehek pri vyichislenii ugla smachivaniya po izobrazheniyu // V Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya «Problemi Informatiki ta komp'yuternoyi tehniki». Pratsi konferentsii. – Chernivtsi: Vidavnichiy dim «Rodovid», 2016. – p. 173–175.
15. Teslenko M.G., Permyakov V.I. Priboryi dlya izmereniya ugla smachivaniya // IV Mizhnarodna naukovo-praktichna konferentsiya «Problemi Informatiki ta komp'yuternoyi tehniki». Pratsi IV mizhnarodnoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi. – Chernivtsi: Vidavnichiy dim «Rodovid», 2015. – P. 198–200.

УДК 004.942: 004.023:519.85

Тесленко М.Г., Пермяков В.І.

**АНАЛІЗ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ МЕТОДУ
ВИМІРЮВАННЯ КУТА ЗМОЧУВАННЯ ЗА ЗОБРАЖЕННЯМ ШЛЯХОМ
ДОСЛІДЖЕННЯ ОБУМОВЛЕНОСТІ ЗАДАЧІ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРОЕКЦІЇ КРАПЛІ**

У статті досліджується алгоритм визначення кута змочування за зображенням краплі на поверхні матеріалу. Проводиться аналіз обумовленості задачі на усьому діапазоні значень вихідних даних із розробкою математичної моделі зображення краплі. Вирішується задача пошуку оптимальної кількості точок, що використовуються алгоритмом у якості вихідних даних. Також знаходиться оптимальне розташування точок за допомогою розв'язання багатомірної задачі оптимізації методом Хука-Дживса.

Ключові слова: крайовий кут змочування, математичне моделювання, число обумовленості, багатомірна оптимізація, метод Хука-Дживса.

УДК 004.942: 004.023:519.85

Тесленко М.Г., Пермяков В.И.

**АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ МЕТОДА
ИЗМЕРЕНИЯ УГЛА СМАЧИВАНИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ПУТЕМ
ИССЛЕДОВАНИЯ ОБУСЛОВЛЕННОСТИ ЗАДАЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЕКЦИИ КАПЛИ**

В статье исследуется алгоритм определения угла смачивания по изображению капли на поверхности материала. Проводится анализ обусловленности задачи на всем диапазоне значений исходных данных с разработкой математической модели изображения капли. Решается задача поиска оптимального количества точек, которые используются алгоритмом в качестве исходных данных. Также, находится оптимальное расположение точек при помощи решения многомерной задачи оптимизации методом Хука-Дживса.

Ключевые слова: краевой угол смачивания, математическое моделирование, число обусловленности, многомерная оптимизация, метод Хука-Дживса.

Teslenko M., Permiakov V.

**ANALYSIS AND DETERMINATION OF THE OPTIMAL PARAMETERS
OF THE METHOD OF MEASURING THE CONTACT ANGLE FROM THE IMAGE
BY MEANS OF RESEARCHING THE CONDITION NUMBER OF THE PROBLEM
USING THE MATHEMATICAL MODEL OF THE DROP PROJECTION**

The article is devoted to the analysis of the algorithm for measurement of the contact angle using the image of a drop on the surface of the material. An analysis of the condition number is carried out over the entire range of values of the initial data, with the development of the model for the image of drop. The problem of finding the optimal number of points that are used as input data is solved. Also, an optimal location of the points is determined by solving the multidimensional optimization problem with Hooke-Jeeves method.

Keywords: contact angle, mathematical modeling, condition number, multidimensional optimization, Hooke-Jeeves method.

УДК 664.3

Лабейко М.А., м.н.с.¹, Литвиненко О.А., к.т.н., старший науковий співробітник²,
Любченко Н.М., магістрант², Гладкий Ф.Ф., д.т.н., професор²

¹Український науково-дослідний інститут олій та жирів НААН України,

²Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЩОДО ГІДРОЛІЗУ ХЛОРОГЕНОВОЇ КИСЛОТИ, ОТРИМАНОЇ ЗІ СОНЯШНИКОВОГО ШРОТУ

Ключові слова: природний антиоксидант, гідроліз хлорогенової кислоти, соняшниковий шрот, кавова кислота, хінна кислота, фермент, реакція омилення

Вступ. Про корисні властивості антиоксидантів відомо давно та досить багато. Вони здатні уповільнювати шкідливі процеси окиснення [1–3], як в організмі людини, так і в жирових продуктах. Існує багато різних антиоксидантів: β-каротин, лікопін, лютеїн антоціани, таніни, вітаміни А, С та Е, флавоноли, фенольні сполуки та інші [4]. Великий інтерес для нашої місцевості представляють певні фенольні сполуки, бо вони містяться у шроті з насіння соняшнику – дешевій вторинній сировині олійних виробництв[5]. Мова йде про хлорогенову [6, 7] та кавову [8] кислоти. Стосовно хлорогенової кислоти слід зазначити, що крім антиокислювальної дії [9, 10], вона володіє великою кількістю інших позитивних властивостей, таких як протимікробна, противірусна, протипухлинна, протигрибкова, протигіпертензивна та інші дії [11, 12]. Кавова кислота впливає на окремі показники загальної гемодинаміки і кардіогемодинаміки, що дає змогу прогнозувати терапевтичний та профілактичний ефекти при таких патологічних станах, як тахіаритмія, гіпоксія та порушення мозкового кровообігу [8]. Найбільший ефект спостерігається під час використання кавової кислоти у кількості 100 мг/кг. Крім того, слід зауважити, що кавова кислота спільно з хлорогеновою та іншими кофeїлхініними кислотами надає наступні ефекти:

- гіпоазотемічний ефект;
- посилює діуретичну функцію нирок;
- стимулює антитоксичну функцію печінки;
- володіє протизапальною дією.

Що стосується антиоксидантної дії хлорогенової та кавової кислот при додаванні їх в олії та жирові продукти, то тут слід акцентувати увагу на тому, що хлорогенова кислота не розчинна у жирах, а кавова навпаки, добре розчиняється. Це дуже важливий аспект, тому що перед дослідниками постає проблема несумісності антиоксиданту та жирового продукту, що викликає необхідність пошуку способу перетворення антиоксиданту у жиророзчинну форму.

Основна частина. Беручи до уваги проблему жиронерозчинних антиоксидантів, нами запропоновано два методи отримання кавової кислоти, як жиророзчинної

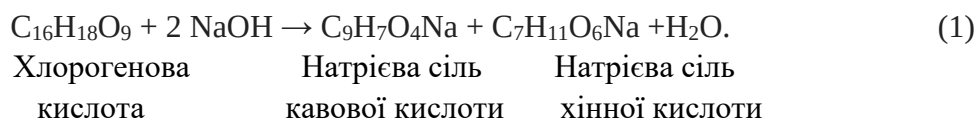
сполуки, за допомогою гідролізу хлорогенової кислоти, отриманої зі соняшникового шроту.

Пробопідготовка сировини є загальною для обох методів. Насіння соняшнику перед аналізом подрібнюють та знежирюють в апараті Сокслета діетиловим або петролейним ефіром. Шроти додатково не знежирюють. Знежирений матеріал подрібнюють до проходу крізь сито з отворами 0,25 мм.

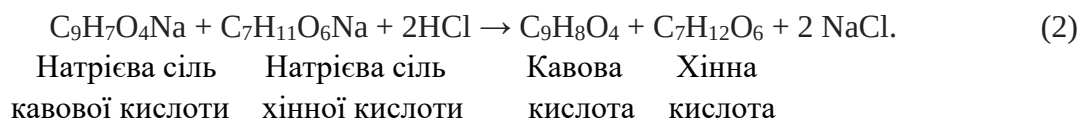
Для вилучення хлорогенової кислоти беруть наважку знежиреного і подрібненого продукту близько 50 г з точністю 0,0002 г і додають до неї 500 мл водного розчину етилового спирту з концентрацією 80%. Екстракцію проводять протягом 60 хвилин при температурі 80 °С у колбі зі зворотнім холодильником на киплячій водяній бані при періодичному взбавуванні. Отриманий екстракт хлорогенової кислоти відокремлюють від вихідного продукту, що екстрагувався, за допомогою фільтрування, після чого методом титрування перманганатом калію отримують данні про кількість хлорогенової кислоти у шроті.

Омилення хлорогенової кислоти за допомогою гідроксиду натрію

Попередньо проводять відгонку етилового спирту з отриманого екстракту хлорогенової кислоти при температурі 80 °С, після чого здійснюють омилення екстракту водним розчином гідроксиду натрію при температурі 50–60 °С на протязі 60 хвилин. Розраховану кількість гідроксиду натрію розчиняють мінімально можливою кількістю води і додають із надлишком 30 %. Якщо для омилення використовується гідроксид калію, тоді здійснюють відповідний перерахунок. При омиленні хлорогенової кислоти утворюються дві натрієві солі кавової та хінної кислот, що наведено у рівнянні 1.



Далі до розчину додають розраховану кількість концентрованої соляної кислоти, в данному випадку приблизно 1 мл. В результаті утворюються кавова та хінна кислоти, що показано у рівнянні 2.



Після цього проводять 3–5-тикратну екстракцію кавової кислоти гексаном, об'єм якого для кожної екстракції складає 50 мл. Далі здійснюють відгонку гексану при температурі 68–70 °С. Отриманий антиоксидант сушать до постійної маси і додають в олії з метою збільшення строку їх придатності. Проведено відповідні дослідження за допомогою диференціальної скануючої колориметрії (ДСК), отримано позитивні результати, які опубліковано у роботі [1].

Ферментативний гідроліз хлорогенової кислоти

До отриманого екстракту хлорогенової кислоти додають розраховану кількість ліполітичного ферменту та перемішують 3–4 години, підігрівуючи на водяній бані до температури не більше 60 °С. Після чого фермент відфільтровують і просушують при кімнатній температурі. Імовірно, кавова кислота адсорбується на поверхні ферменту, тому що в екстракті не помітно поділу фаз, або осаду. Враховуючи жиророзчинність кавової кислоти, додають фермент до соняшникової олії масою 100 г та перемішують 30–40 хвилин. Потім відфільтровують фермент від олії. Після цього перевіряють наявність антиоксиданту в отриманому зразку олії за допомогою визначення індукційного періоду методом диференціальної скануючої колориметрії (ДСК) та порівнянням отриманого результату з результатом контрольного зразка (олії без додавання антиоксиданту). На даний момент проводяться дослідження у цьому напрямку.

Висновки. Запропоновано два методи гідролізу хлорогенової кислоти, виділеної у водно-спиртовий розчин зі шроту з насіння соняшнику. Гідроліз хлорогенової кислоти проводили задля отримання кавової кислоти, як жиророзчинного антиоксиданту. Вказаний антиоксидант можна додавати до олій та жирів для уповільнення процесів окиснення, що відбуваються у жирових продуктах.

За першим методом – методом омилення хлорогенової кислоти гідроксидом натрію, виділено продукт та досліджено його антиоксидантні властивості. В ході досліджень отримано позитивні результати.

За другим методом – методом гідролізу хлорогенової кислоти за допомогою ліполітичного ферменту, на даний час проводяться дослідження.

Література

1. Лабейко М.А. Про здатність природних антиоксидантів впливати на окиснення харчових рослинних олій / М.А. Лабейко, О.А. Литвиненко, Н.М. Любченко [та ін.] // Інтегровані технології та енергозбереження. –2019. – №1. – С. 78–85.
2. Шаповалова И.Е. Возможность использования подсолнечного шрота как источника природного антиоксиданта – хлорогеновой кислоты /И.Е. Шаповалова, З.П. Федякина // Олійно-жировий комплекс. –2013. – №2 (41). – С.49–50.
3. Шаповалова И.Е. Обоснование получения хлорогеновой кислоты из подсолнечного шрота / И.Е. Шаповалова, З.П. Федякина, И.Н. Демидов и [др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий: –2013. – № 6/6. – С. 39–41.
4. 7 видов антиоксидантов, какие они бывают и где содержатся [Електронний ресурс] / 2011. Режим доступа: URL: <https://zoneplanet.ru/antioksidanty/>.
5. Литвиненко О.А. Виробництво харчових форм білків із насіння олійних культур/ [О.А. Литвиненко, Ф.Ф. Гладкий, З.П. Федякіна]. – К.: Аграр. Наука, 2016. – 52 с.
6. Yang D. Development of a new chlorogenic acid certified reference material for food and drug analysis / D. Yang,; L. Jiao, Tai Ling [et al.] // JOURNAL OF PHARMA-

CEUTICAL AND BIOMEDICAL ANALYSIS. – 2017. – Vol. 140. – P. 169–173. doi: 10.1016/j.jpba.2017.03.026

7. Добрунов Дмитро Євгенійович. Технологія комплексної переробки соняшникової макухи з безлушпинного ядра : дис. ... канд. техн. наук : 05.18.06 / Дмитро Євгенійович Добрунов. – Харків, 2016. – 181 с. – Бібліогр.: с. 136–151.

8. Чуклин Роман Євгенєвич. Влияние кофейной кислоты на сердечно-сосудистую систему в эксперименте : дис. ... канд. мед. наук : 14.03.06 / Роман Євгенєвич Чуклин. – Курск, 2012. – 130 с.

9. Левицкий А.П. Хлорогеновая кислота: биохимия и физиология / А.П. Левицкий, Е.К. Вертикова, И.А. Селиванская // Мікробіологія і біотехнологія. – 2010. – №2. – С. 6–20.

10. Karamac M. Antioxidant activity of phenolic compounds identified in sunflower seeds / M. Karamac, A. Kosinska, I. Estrella [et al.] // Eur Food Res Technol. – 2012. – Vol. 235. – P. 221–230.

11. Лекарь А.В. Экстракция хлорогеновой кислоты из сабельника болотного COMARUS PALUSTRE L. В среде субкритической воды / А.В. Лекарь, О.В. Филонова, С.Н. Борисенко [и др.] // Химия растительного сырья. – 2014. – №3. – С. 201–207. DOI: 10.14258 / jeprm. 1403201.

12. Zhao Y. Antihypertensive effects and mechanisms of chlorogenic acids / Y. Zhao., J. Wang, O. Ballevre, [et al.] // Hypertension Research. – 2012. – Vol. 35. – N 4. – Pp. 370–375.

Bibliography (transliterated)

1. Labeyko M.A. Pro zdatnist prirodnih antioksidantiv vplivati na okisnennya harchovih roslinnih oliy / M.A. Labeyko, O.A. Litvinenko, N.M. Lyubchenko [ta in.] // Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2019. – №1. – Pp. 78–85.

2. Shapovalova Y.E. Vozmozhnost yspolzovaniya podsolnechnoho shrota kak ystochnyka pryrodnoho antyoksydanta – khlorohenovoi kyslotu / Y.E. Shapovalova, Z.P. Fediakyna // Oliino-zhyrovyyi kompleks. – 2013. – №2 (41). – Pp. 49–50.

3. Shapovalova I.E. Obosnovanie polucheniya hlorogenovoy kisloty iz podsolnechnoho shrota / I.E. Shapovalova, Z.P. Fedyakina, I.N. Demidov i [dr.] // Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovyih tehnologiy: – 2013. – № 6/6. – Pp. 39–41.

4. 7 vidov antioksidantov, kakie oni byvayut i gde sodержatsya [Elektronnyj resurs] / 2011. Rezhim dostupa: URL: <https://zoneplanet.ru/antioksidanty/>.

5. Lytvynenko O.A. Vyrobnystvo kharchovykh form bilkiv iz nasinnia oliinykh kultur / [O.A. Lytvynenko, F.F. Hladkyi, Z.P. Fediakina]. – K.: Ahrar. Nauka, 2016. – 52 p.

6. Yang D. Development of a new chlorogenic acid certified reference material for food and drug analysis / D. Yang., L. Jiao, Tai Ling [et al.] // JOURNAL OF PHARMACEUTICAL AND BIOMEDICAL ANALYSIS. – 2017. – Vol. 140. – Pp. 169–173. doi: 10.1016/j.jpba.2017.03.026.

7. Dobrunov Dmitry Evgeniyovich. Tehnologiya kompleksnoyi pererobki sonyashnikovoyi makuhi z bezlushpinnogo yadra : dis. ... kand. tehn. nauk : 05.18.06 / Dmitry Evgeniyovich Dobrunov. – Harkiv, 2016. – 181 p. – Bibliogr.: Pp. 136–151.

8. Chuklin Roman Evgenevich. Vliyanie kofeynoy kisloty na serdechno-sosudistuyu sistemu v eksperimente : dis. ... kand. med. nauk : 14.03.06 / Roman Evgenevich Chuklin. – Kursk, 2012. – 130 p.

9. Levitskiy A.P. Hlorogenovaya kislota: biohimiya i fiziologiya / A.P. Levitskiy, E.K. Vertikova, I.A. Selivanskaya // Mikrobiologiya i biotekhnologiya. – 2010. – №2. – Pp. 6–20.

10. Karamac M. Antioxidant activity of phenolic compounds identified in sunflower seeds / M. Karamac, A. Kosinska, I. Estrella, T. Hernandez, M. Duen // Eur Food Res Technol. – 2012. – Vol. 235. – P. 221–230.

11. Lekar A.V. Ekstraktsiya hlorogenovoy kisloty iz sabelnika bolotnogo COMARUS PALUSTRE L. V srede subkriticheskoy vody / A.V. Lekar, O.V. Filonova, S.N. Borisenko [i dr.] // Himiya rastitelnogo syirya. – 2014. – №3. – Pp. 201-207. DOI: 10.14258 / jepm. 1403201.

12. Zhao Y. Antihypertensive effects and mechanisms of chlorogenic acids / Y. Zhao., J. Wang, O. Ballevre, [et al.] // Hypertension Research. – 2012. – Vol. 35. – N 4. – Pp. 370–375.

УДК 664.3

Лабейко М.А., Литвиненко О.А., Любченко Н.М., Гладкий Ф.Ф.

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ЩОДО ГІДРОЛІЗУ ХЛОРОГЕНОВОЇ КИСЛОТИ, ОТРИМАНОЇ ЗІ СОНЯШНИКОВОГО ШРОТУ

У статті розглянуто корисні властивості таких фенольних сполук соняшникового шроту, як хлорогенова та кавава кислоти. Крім того, зроблено акцент на тому, що хлорогенова кислота хоча і є потужним антиоксидантом, але не розчиняється в жирах, що ускладнює її використання в якості антиоксиданту в жирових продуктах та оліях. Кавава ж кислота, навпаки, розчинна у жирах, що є її перевагою в даному випадку у порівнянні з жиронерозчинними антиоксидантами. Запропоновано два методи гідролізу хлорогенової кислоти: омилення гідроксидом натрію та ферментативне розщеплення. В результаті утворюються кавава та хінна кислоти, що дає змогу подальшого окремого використання цих сполук.

Ключові слова: природний антиоксидант, гідроліз хлорогенової кислоти, соняшниковий шрот, кавава кислота, хінна кислота, фермент, реакція омилення

УДК 664.3

Лабейко М.А., Литвиненко Е.А., Любченко Н.М., Гладкий Ф.Ф.

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГИДРОЛИЗА ХЛОРОГЕНОВОЙ КИСЛОТЫ, ПОЛУЧЕННОЙ ИЗ ПОДСОЛНЕЧНОГО ШРОТА

В статье рассмотрены полезные свойства таких фенольных соединений подсолнечного шрота, как хлорогеновая и кофейная кислоты. Кроме того сделан акцент на том, что хлорогеновая кислота хоть и является мощным антиоксидантом, но не растворяется в жирах, что затрудняет ее использование в качестве антиоксиданта в жировых продуктах и растительных маслах. Кофейная же кислота, наоборот, растворима в жирах, что является ее преимуществом в данном случае по сравнению с жиронерастворимыми антиоксидантами. Предложены два способа гидролиза хлорогеновой кислоты: омыление гидроксидом натрия и ферментативное расщепление. В результате образуются кофейная и хинная кислоты, что дает возможность дальнейшего раздельного использования этих соединений.

Ключевые слова: природный антиоксидант, гидролиз хлорогеновой кислоты, подсолнечный шрот, кофейная кислота, хинная кислота, фермент, реакция омыления.

Labeiko M.A., Litvinenko E.A., Liubchenko N.M., Gladkii F.F.

SOME HYDROLYSIS ASPECTS OF CHLOROGENIC ACID RECEIVED FROM SUNFLOWER MEAL

The article discusses the beneficial properties of such phenolic compounds of sunflower meal as chlorogenic and caffeic acids. In addition, emphasis was placed on the fact that chlorogenic acid, although a powerful antioxidant, does not dissolve in fats, which makes it difficult to use it as an antioxidant in fatty products and vegetable oils. Caffeic acid, on the contrary, is soluble in fats, which is its advantage in this case compared to fat-soluble antioxidants. Two methods for the hydrolysis of chlorogenic acid are proposed: saponification with sodium hydroxide and enzymatic cleavage. As a result, caffeic and quinic acids are formed, which allows further separate use of these compounds.

Keywords: natural antioxidant, hydrolysis of chlorogenic acid, sunflower meal, caffeic acid, quinic acid, enzyme, saponification reaction.

УДК 622.248.5

Римчук Д.В., к.техн.н., доцент, Куш А.І., аспірант, Драгомирецький В.О., студент

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
кафедра «Видобування нафти, газу та конденсату»***ПІДВИЩЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН**

Ключові слова: герметичність різьбових з'єднань, бурильна труба, обсадна труба, насосно-компресорна труба, різьбові мастила, різьбове з'єднання URJ.

Ствол свердловини – це системи трубопроводів утворених із труб різного діаметру, концентрично розташованих навколо однієї осі, у яких рухаються потоки рідин, газів або їх сумішей у різних напрямках при різних тисках. Всі ці трубопроводи складаються із окремих труб, з'єднаних між собою та з гирловим обладнанням за допомогою різьбових з'єднань.

При будівництві, облаштуванні та експлуатації нафтових і газових свердловин використовується велика кількість наземних трубопроводів, виготовлених із бурильних, насосно-компресорних та обсадних труб, що з'єднуються між собою за допомогою різьбових з'єднань: маніфольд противикидного обладнання, маніфольд для подачі бурового розчину від насосів до бурового стояка, лінії глушіння свердловин, лінії для подачі рідини при гідророзриві, гідропіскоструминній перфорації, тощо.

Негерметичність різьбових з'єднань обсадних колон, наземних свердловинних трубопроводів може бути причиною виникнення відкритих газових або нафтових фонтанів, а інколи і грифонів – фонтанування поза межами гирла свердловини. І як наслідок втрата великої кількості вуглеводнів, а інколи і цілих родовищ.

Питання герметичності різьбових з'єднань вирішуються у двох напрямках: перший – герметизація різьбових з'єднань шляхом застосування різних ущільнюючих матеріалів другий – це створення різьбових з'єднань Преміум, що мають додаткові вузли ущільнення «метал по металу».

Герметичність різьбових з'єднань труб – це властивість з'єднань, що забезпечує непроникність при навантаженні надлишковим тиском рідини або газу на протязі тривалого часу.

На проникність різьбових з'єднань впливають конструктивні особливості різьб (рис. 1). Зазори в різьбі – це гвинтові канали, що сполучують внутрішню та зовнішню порожнини труб. Зазори (z) називаються конструктивними.

Крім конструктивних зазорів у кожному різьбовому з'єднанні також присутні зазори технологічного характеру, котрі визначаються відхиленням елементів профілю від теоретичних розмірів. Конструктивні та технологічні зазори в різьбі приводять до того, що контакт труби з муфтою в різьбовому з'єднанні проникливий – з'єднання само по собі негерметично. Для ліквідування проникності контакту елементів різьбових з'єднань на практиці застосовують різні наповнювачі конструкторних і технологічних зазорів – різьбові мастила. Експлуатаційні властивості різьбових мастил для з'єднання

обсадних, насосно-компресорних і трубопровідних труб із з'єднаннями класу Преміум і різьбових упорних з'єднань елементів бурильної колони включають:

- трибологічні властивості, котрі забезпечують точне та рівномірне спряження з'єднання;
- властивості мастила, що забезпечують стійкість з'єднання до утворення задирок або руйнування контактних поверхонь під час згвинчування та розгвинчування;
- герметизуючі властивості для з'єднань з ущільненням по різьбі і/або властивості, котрі не погіршують герметичність з'єднань, що мають спеціальні елементи ущільнення (наприклад, вузли ущільнення «метал-метал», ущільнювальні кільця із політетрафторетилену і т.д.), в залежності від вимог до експлуатації
- фізико-хімічну стійкість в умовах експлуатації та передбачуваних умовах зберігання різьбових мастил;
- властивості, котрі забезпечують ефективне нанесення різьбових мастил на контактні поверхні з'єднання в передбачуваних умовах експлуатації та середовищах.

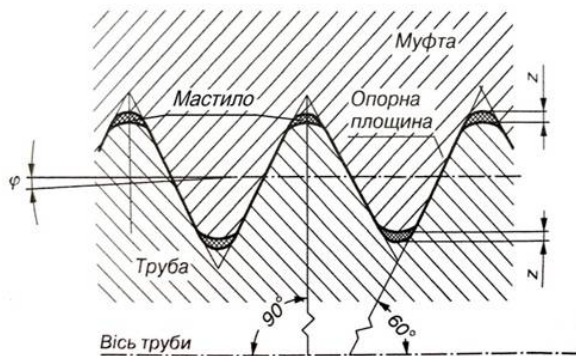


Рисунок 1 – Канал у різьбовому з'єднанні заповнений мастилом

Спеціалістами американського нафтового інституту розроблений міжнародний нормативний документ, котрий регламентує вимоги до модифікованого різьбового мастила API: склад, розміри частинок металевих включень, способи перевірки властивостей, контрольні показники властивостей.

Цим документом повинні керуватися як виробники різьбових мастил так і користувачі. Виробники різьбових мастил мають право тільки покращувати властивості мастил.

Модифіковане різьбове мастило API – це суміш порошків різних металів і графіту, рівномірно розподілених в основі мастила. Всі мастила, що використовуються для герметизації різьбових з'єднань нафтогазових труб повинні відповідати модифікованому мастилу API та містити тверді добавки суміші аморфного графіту, порошку свинцю, цинку, і лусочок міді, що вказані в таблиці 1.

Дуже слабкою ланкою, котра впливає на герметичність свердловин, є елементи колони бурильних, обсадних і насосно-компресорних труб, що виготовляються у механічних майстернях бурових компаній, у яких відсутній повний технологічний цикл виготовлення та контролю.

Таблиця 1 – Пропорції твердих добавок

Компонент	Масова доля, %	
	В твердих добавках	В мастилі
Аморфний графіт	28.0	18.0±1.0
Порошок свинцю	47.5	30.5±0.6
Порошок цинку	19.3	12.2±0.6
Лусочки міді	5.2	3.3±0.3
Всього	100	64

Всі елементи, котрими комплектуються колони бурильних, обсадних, і насосно-компресорних труб (перевідники, крани кульові, патрубки для монтажу колонних обв'язок, стикувальні пристрої при спуску колон секціями, муфти двоступеневого цементування, зворотні клапани, підвісні патрубки, тощо), повинні мати показники по міцності та герметичності не гірші ніж у самих труб, а їх різьби і елементи герметизацій стикувальних вузлів за конструкцією і розмірами повинні відповідати і елементам герметизації труб. Ці елементи повинні виготовлятися у відповідності до технічних умов.

В технічних умовах, окрім іншого, повинно бути передбачено захисне покриття різьби, контроль профілю різьби. Складовою технічних умов повинні бути «Програма та методика випробувань».

На сьогодні газовидобувним підприємством поставляються колонні обв'язки ОКК1 і ОКК2, на корпусах колонних головок ГК1 котрих нарізана різьба за ГОСТ 632-80 трикутного профілю з заокругленими вершинами, герметичність котрої забезпечує тільки мастило. А ці колонні обв'язки монтуються на обсадні колони з високо герметичною різьбою з ущільненнями «метал по металу». що можливо тільки з використанням перевідника. Пропонується змінити конструкцію корпусів колонних головок ГК1 колонних обв'язок ОКК1 і ОКК2, передбачивши високогерметичне різьбове з'єднання з упорною різьбою і елементом ущільнення «метал – метал».

Газонафтовидобувні підприємства закупляють фонтанні арматури не враховуючи, те які ліфтові труби будуть підвішуватись у цих фонтанних арматурах. У більшості випадків заводи комплектують фонтанні арматури патрубками, котрі закінчуються різьбою НКМ 89, а газовидобувникам необхідно підвісити високо герметичні труби діаметром 73мм. Це можна здійснити використавши перевідник, а цей перевідник, що встановлюється безпосередньо на гирлі сприймає вагу всієї колони і максимальні тиски. І коли він виготовлений не у відповідності з технічними умовами то стає «потенційно небезпечним» з точки зору міцності та герметично-

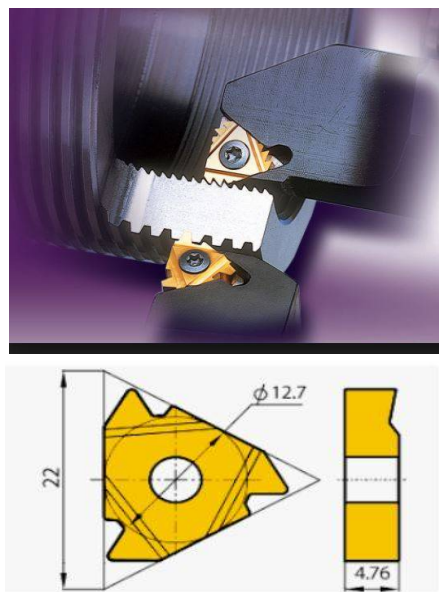


Рисунок 2 – Різці для нарізання трубних різьб

сті. Отже при закупівлі фонтанних арматур необхідно замовляти підвісні патрубки з різьбою, яка б відповідала різьбі ліфтових труб, котрі будуть використовуватись.

При нарізанні різьб в механічних майстернях слід відмовитись від різців з напаяними твердосплавними пластинами, у котрих профіль ріжучої частини різця, а значить і профіль різьби формує токар «на око» на заточному верстаті.

Для нарізання різьб слід використовувати різці (рис. 2), оснащенні спеціальними пластинами, котрі кріпляться до оправки різця болтами. Профіль ріжучих елементів пластин відповідає профілю різьби. На ріжучі кромки елементів пластин нанесені спеціальні зносостійкі покриття, що забезпечують нарізання до десяти різьб одним елементом або до тридцяти різьб однією пластиною. Випускаються елементи під усі профілі та типорозміри трубних різьб.

[1,2,3,5,6,7,8] Авторами проаналізовано всі нормативні документи, що регламентують герметичність різьбових з'єднань насосно-компресорних, обсадних і буриньних труб.

У [5] нічого не сказано про додаткові засоби захисту та про особливості експлуатації труб з різьбовими з'єднаннями Преміум класу. Використання труб з різьбовими з'єднаннями Преміум вимагає більш високої культури виробничого процесу при підготовці, транспортуванні та експлуатації цих труб. Всі вимоги до цього процесу повинні бути чітко розписані в регламентуючих документах – стандартах організації України.

На рис 3. показано різьбове з'єднання UPJ та його елементи. Герметичність цього з'єднання досягається за рахунок використання різьбового мастила та за рахунок створення контактного зусилля, з яким виступ ніпеля труби упирається у виточку в муфті. Збереження цілісності і неушкодженості цих елементів повинна бути приділена велика увага. Виступ у муфті можна пошкодити при шаблонуванні труби ударом шаблону по виступу. Щоб запобігти цьому пропонується використовувати шаблон з направляючим конусом. Велика увага повинна бути приділена як до процесу підготовки різьби перед нанесенням мастила так і до самого процесу нанесення мастила.

При знаходженні труб на містках з різьб розчинником повинно буде видалено консерваційне мастило після цього різьби промиваються парою. А вже на буровій очищаються стисненням повітрям. При нанесенні мастила на різьбу необхідно слідкувати, щоб мастило не попало на контактуючі поверхні труби та муфти, так як, частинки металів, що входять до складу мастила, можуть бути причиною негерметичності різьбового з'єднання. [5] необхідно доопрацювати з урахуванням вище викладеного.

У нормативному документі [7], котрий регламентує експлуатацію обсадних колон, закладено декілька причин можливих негерметичностей різьбових з'єднань. Так у п.1П.3.7 говориться ...«Різі вітчизняних обсадних труб і труб виробництва СНД, а ім-

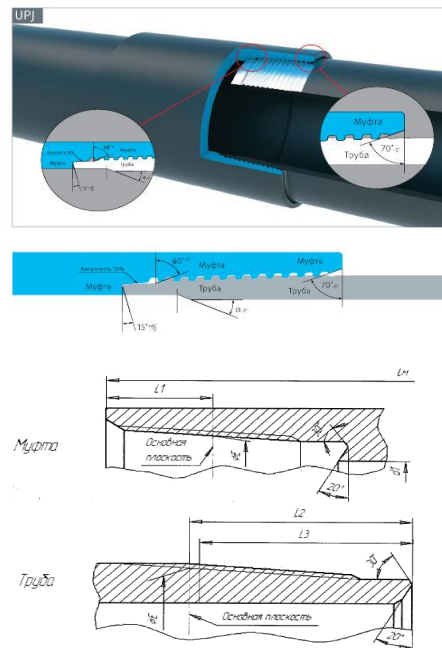


Рисунок 3 – Різьбове з'єднання UPJ

портні в разі потреби, – перед згвинчуванням потрібно змастити герметизуючим мастилом».... Це трактування невірне, ні одне з'єднання імпортованих труб не буде герметичним без мастила. Необхідно [7] відредагувати з урахуванням вище викладеного.

Основною причиною негерметичності різьбових з'єднань бурових труб є незнання і нерозуміння працівниками бурових підприємств принципів і механізмів ущільнення цих з'єднань.

У замковому з'єднанні бурових труб існує два незалежні один від одного вузли ущільнення – подвійний захист від проникнення рідини чи газу через це з'єднання: перший – це герметизація різьби шляхом нанесення спеціального мастила на очищені поверхні різьби перед скручуванням і заповнення цим мастилом конструктивних і технологічних каналів цього з'єднання при скручуванні; другий – це створення необхідних контактних зусиль на контактуючих поверхнях муфти та ніпеля замкового з'єднання при скручуванні з необхідним крутним моментом. Основне ущільнення – це ущільнення за допомогою мастила нанесеного на різьбу з'єднання, а більшість працівників бурових підприємств думають, що основний вузол ущільнення замкового з'єднання – це контактуючі поверхні муфти та ніпеля.

Причини негерметичності першого вузла:

- використання мастила, що має низькі антифракційні, антикорозійні та протизадиркові властивості і не забезпечує щільності з'єднання;
- не очищення поверхонь різьби перед нанесенням мастила.

Причини негерметичності другого вузла:

- недостатня величина крутного моменту згвинчування різьбового з'єднання;
- згвинчування різьбового з'єднання з неочищеною різьбою пошкодження контактуючих поверхонь муфти і ніпеля;
- перекося упорного торця муфти і упорного уступу ніпеля замка.

При співпаданні двох негативних факторів, що є причиною негерметичності кожного вузла, виникає проникнення бурового розчину через замкові з'єднання та подальше його розмивання.

В даний час для змащування замкових різьб широко використовується графітне консистентне мастило наступного складу (вага, %): графіт – 50, технічний жир – 5, каустична сода – 2, мінеральне машинне масло – 43. Це мастило достатньо дешеве, має відносно високі антифракційні властивості, але внаслідок високих питомих тисків, що виникають у процесі згвинчування, не захищає різьбу від задирок і не забезпечує надійного ущільнення. Основними причинами негерметичності з'єднання труби з замком є:

- недостатня температура нагріву замка перед накручуванням;
- недостатня величина крутного моменту при скручуванні замка з трубою;
- використання герметизуючого мастила, котре не відповідає умовам процесу – температура нагріву замка 350-450°C.

Пропонується при експлуатації бурових труб використовувати мастило у відповідності з рекомендаціями API BULL 5A2 Бюлетень.

При проведенні робіт із спуску труб під тиском для зменшення тиску на гірлі свердловину № 2 Водянівська (рис. 4) пустили в роботу на факельний амбар через дві викидні лінії маніфольда ОП. При цьому викидні лінії були направлені в одну сторону.

Викидна лінія після блоку глушіння і двох поворотів на 90° була зібрана із бурильних труб із зношеними замковими різьбами. Для герметизації замкового з'єднання використовувалось графітне мастило. Ця лінія проходила в безпосередній близькості до бурової установки. При роботі свердловини газоконденсатною сумішшю виникли пропуски газу через замкові з'єднання, котрі прийшлося оперативно усувати з метою попередження загоряння бурової установки.

Основною причиною пропусків газу через різьбове з'єднання бурильних труб – використання мастила, котре відповідає вимогам нормативних документів і не герметизує зношену різьбу.

Отже [1] необхідно доповнити, що викидні лінії після поворотів, котрі проходять у безпосередній близькості до бурової установки повинні з'єднуватись за допомогою фланців, а різьбові з'єднання викидних ліній, що збираються із бурильних труб із зношеною замковою різьбою повинні ущільнюватись мастилом, що містить пластичні наповнювачі наприклад Дредкот–705.

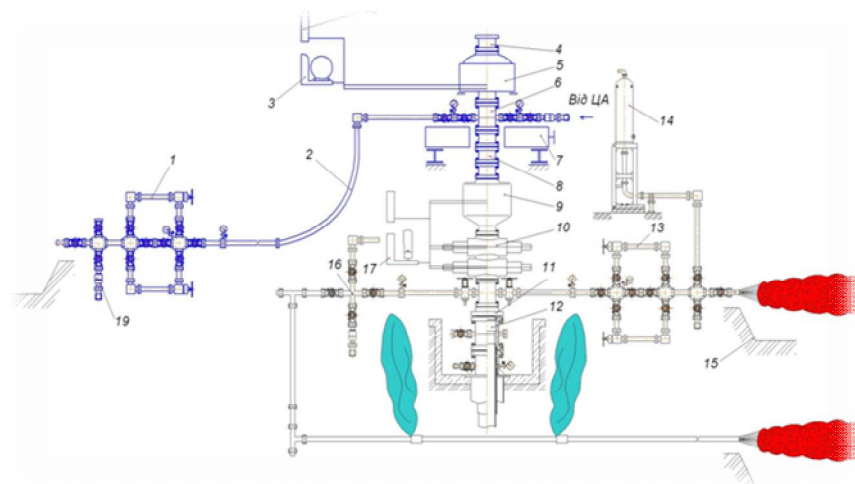


Рисунок 4 – Схема обв'язки гирла свердловини №2 Водянівська противикидним обладнанням при примусовому спуску бурильних і обсадних труб під тиском

1, 13 – блок дроселювання 80х70; 2 – гнучкий рукав 80х70; 3 – система гідроуправління проти-викидним обладнанням СН6U румунського виробництва; 4, 8 – котушка двофланцева 350х35; 5 – універсальний превентор SHAFFER 350х35; 6 – хрестовина 350х35/80х35; 7 – ротор; 9 – універсальний превентор FH35-35/70 Annual BOP фірми SHENKAI PETROLEUM EQUIPMENT; 10 – спарений плашковий превентор 350х70 Double (нижні плашки – глухі, верхні плашки для труб 127 мм) фірми Texas First Industrial Corp; 11 – фланець-адаптор 350 х 70-280х105; 12 – колонна обв'язки ОКК 2 – 105-168х245х324; 14 – сепаратор; 15 – амбар; 16 – блок глушіння 80х70; 17 – система гідроуправління противикидним обладнанням 6 station BOPCS фірми OCO Pressure control; 18 – допоміжний пульт гідроуправління проти викидним обладнанням СН6U румунського виробництва; 19 – зворотний клапан

Висновок

Пропонуємо нормативні документи, що регламентують порядок експлуатації зберігання, транспортування та відбракування обсадних та бурильних труб, а також у документи що регламентують порядок монтажу та експлуатації колонних обв'язок, противикидного обладнання, фонтанних арматур внести зміни у відповідності до рекомендацій викладених у даній статті.

Література

1. Свердловини на нафту і газ. Вимоги до монтажу і експлуатації противикидно-го обладнання при бурінні. СОУ 11.2-30019775-142:2008 зі змінами № 2-2014. [Чинний від 30.12.2008] – К.: ДК “Укргазвидобування”, 2008. – 66 с.
2. Свердловини на нафту і газ. Вимоги до монтажу і експлуатації колонних головок при бурінні свердловин. СОУ 11.2-30019775-141:2008. [Чинний від 30.12.2008] – К.: ДК “Укргазвидобування”, 2008. – 28 с.
3. Свердловини на нафту і газ. Попередження газонафтоводопроявів і відкритих фонтанів під час спорудження і капітального ремонту свердловин. СОУ 09.1-30019775-245:2015. [Чинний від 16.01.2016] – К.: ПАТ “Укргазвидобування”, 2015. – 87 с.
4. Римчук Д.В. Шляхи підвищення рівня фонтанної безпеки при бурінні глибоких свердловин [текст]/ Римчук Д.В., Герасименко А.В.// Питання розвитку газової промисловості України: зб. наукових праць. Вип. XLV-X. УкрНДІгаз, 2017.– с. 94–101.
5. Свердловини на нафту і газ. Порядок експлуатації, зберігання, транспортування, відбракування і списання насосно- компресорних труб. СОУ 09.1-30019775-158:2018 [Чинний від 27.04.2018]- К.ДК «Укргазвидобування», 2018–118 с.
6. Свердловини на нафту і газ. Випробування обсадних колон на герметичність. СОУ 09.1-30019775-215:2013 [Чинний від 04.04.2014 р.] – К.: ПАТ “Укргазвидобування”, 2013. – 40 с.
7. Свердловини на нафту і газ. Обсадні труби. Порядок експлуатації. СОУ 09.1-30019775-258:2018 [Чинний від 08.02.2018 р.]–К.: ПАТ “Укргазвидобування”, 2018.– 47 с.
8. Свердловини на нафту і газ. Порядок експлуатації, зберігання, транспортування, відбракування, і списання бурильних труб. СОУ 09.1–30019775–183:2018 [Чинний від 17.04.2018 р.] – К.: ПАТ “Укргазвидобування”, 2018. – 110 с.
9. API Spec 5CT/ISO 11960 Specification for Casing and Tubing.
10. И. Пустовойтенко. Предупреждение и ликвидация аварий в бурении // [Текст] / И. Пустовойтенко. – М.: Недра. – 1987.
11. М. Мислюк. Буріння свердловин. Довідник. У5 т Т.5.: Ускладнення. Аварії. Екологія. [Текст] / М.Мислюк, І. Рибич, Р.С. Ярмійчук. – К.: Інтерпрес ЛТД., 2004.
12. Трубы нефтяного сортамента. Справочное руководство. 3-е изд., перераб. и доп. [Текст]. – М., Недра, 1987.
13. API BULL 5A2 Bulletin on thread compounds for casing, tubing, and line pipe.
14. API RP 5A3 Recommended Practice on Thread Compounds for Casing, Tubing, Line Pipe, and Drill Stem Elements, 3rd Edition, November 2009.

Bibliography (transliterated)

1. Sverdlovyny na naftu i haz. Vymohy do montazhu i ekspluatatsiyi protyvykydnoho obladdnannya pry burinni. SOU 11.2-30019775-142:2008 zi zminamy № 2-2014. [Chynnyy vid 30.12.2008] – K.: DK “Ukrhazvydobuvannya”, 2008. – 66 p

2. Sverdlovyny na naftu i haz. Vymohy do montazhu i ekspluatatsiyi kolonnykh holovok pry burinni sverdlovyn. SOU 11.2-30019775-141:2008. [Chynnyy vid 30.12.2008] – K.: DK “Ukrhazvydobuvannya”, 2008. – 28 p.

3. Sverdlovyny na naftu i haz. Poperedzhennya hazonaftovodoproayviv i vidkrytykh fontaniv pid chas sporudzhennya i kapital'noho remontu sverdlovyn. SOU 09.1-30019775-245:2015. [Chynnyy vid 16.01.2016] – K.: PAT “Ukrhazvydobuvannya”, 2015. – 87 p.

4. Rymchuk D.V. Shlyakhy pidvyshchennya rivnya fontannoyi bezpeky pry burinni hlybokyykh sverdlovyn [tekst]/ Rymchuk D.V., Herasymenko A.V.// Pytannya rozvytku hazovoyi promyslovosti Ukrayiny: zb. naukovykh prats'. Vyp. XLV-KH. UkrNDIhaz, 2017.– 94-101 p.

5. Sverdlovyny na naftu i haz. Poryadok ekspluatatsiyi, zberihannya, transportuvannya, vidbrakuvannya i spysannya nasosno- kompresornykh trub. SOU 09.1-30019775-158:2018 [Chynnyy vid 27.04.2018]- K.DK «Ukrhazvydobuvannya», 2018–118p.

6. Sverdlovyny na naftu i haz. Vyprobuвання obsadnykh kolon na hermetychnist'. SOU 09.1-30019775-215:2013 [Chynnyy vid 04.04.2014 r.] – K.: PAT “Ukrhazvydobuvannya”, 2013. – 40 p.

7. Sverdlovyny na naftu i haz. Obsadni truby. Poryadok ekspluatatsiyi. SOU 09.1-30019775-258:2018 [Chynnyy vid 08.02.2018 r.] –K.: PAT “Ukrhazvydobuvannya”, 2018. – 47 p.

8. Sverdlovyny na naftu i haz. Poryadok ekspluatatsiyi, zberihannya, transportuvannya, vidbrakuvannya, i spysannya buryl'nykh trub. SOU 09.1–30019775–183:2018 [Chynnyy vid 17.04.2018 r.] – K.: PAT “Ukrhazvydobuvannya”, 2018. – 110 p.

9. API Spec 5CT/ISO 11960 Specification for Casing and Tubing.

10. Y. Pustovoytenko. Preduprezhdenye y lykvydatsyya avaryy v burenyy // [Tekst] / Y. Pustovoytenko. – M.: Nedra. – 1987.

11. M. Myslyuk. Burinnya sverdlovyn. Dovidnyk. U5 t T.5.: Uskladnennya. Avariya. Ekolohiya. [Tekst] / M.Myslyuk, I. Rybchych, R.S. Yarmiychuk. – K.: Interpres LTD, 2004.

12. Truby neftyanoho sortamenta. Spravochnoe rukovodstvo. 3-e yzd., pererab. y. dop. [Tekst]. – M., Nedra, 1987.

13. API BULL 5A2 Bulletin on thread compounds for casing, tubing, and line pipe.

14. API RP 5A3 Recommended Practice on Thread Compounds for Casing, Tubing, Line Pipe, and Drill Stem Elements , 3rd Edition, November 2009.

УДК 622.248.5

Римчук Д.В., Куш А.І., Драгомирецький В.О.

ПІДВИЩЕННЯ ГЕРМЕТИЧНОСТІ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН

Авторами проаналізовано документи, що регламентують порядок експлуатації насосно-компресорних, обсадних та експлуатаційних труб, при цьому встановлено ряд

вимог або їх відсутність, що впливають на герметичність різьбових з'єднань. Запропоновані ряд заходів, щодо забезпечення герметичності нафтових і газових труб.

Ключові слова: герметичність різьбових з'єднань, бурильна труба, обсадна труба, насосно-компресорна труба, різьбові мастила, різьбове з'єднання UPJ.

УДК 622.248.5

Рымчук Д.В., Кушч А.И., Драгомирецкий В.А.

ПОВЫШЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ СКВАЖИН

Авторами проанализированы документы, регламентирующие порядок эксплуатации насосно-компрессорных, обсадных и эксплуатационных труб, при этом установлен ряд требований или их отсутствие, влияющие на герметичность резьбовых соединений. Предложены ряд мер, по обеспечению герметичности нефтяных и газовых труб.

Ключевые слова: герметичность резьбовых соединений, бурильная труба, обсадная труба, насосно-компрессорная труба, резьбовые смазки, резьбовые соединения UPJ.

Rymchuk D.V., Kushch A.I., Dragomyretskiy V.O.

GROWTH OF HERMETICITY OF OIL AND GAS WELLS

The authors analyze the documents regulating the operation of pump-compressor, casing and operating pipes, with a number of requirements or their absence, which affect the tightness of threaded joints.

Keywords: tightness of threaded joints, drill pipe, casing pipe, pump-compressor pipe, threaded lubricants, threaded joints UPJ.

УДК 621:658.562.3/6

Фоменко Д.С., аспірант, Костенко В.Л., доктор технічних наук, професор

*Одеський національний політехнічний університет***ДИНАМІЧНА НЕВРІВНОВАЖЕНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ
ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ ГАЗОКОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ**

Ключові слова: динамічна неврівноваженість, металеві тіла обертання, газоперекачувальні агрегати, газокompресорні станції.

Вступ. Сталий розвиток газової галузі полягає у забезпеченні надійності, ефективності використання та експлуатації газотранспортної мережі [1]. Оптимальним режимом експлуатації магістральних газопроводів є, перш за все, максимальне використанні їх пропускної здатності, забезпечуючи при цьому мінімальні витрати на стиснення газу та його транспортування. Такий режим тісно пов'язаний з роботою газокompресорних станцій, які будуються на трасах газопроводу.

Безаварійна робота газокompресорних станцій пов'язана з таким основним завданням як здійснення контролю розвитку коливальних процесів металевих тіл обертання, тобто процесів вібрації, яка вказує на несправну роботу газоперекачувальних агрегатів. Тому виникає необхідність розробок, що пов'язані з контролем динамічної неврівноваженості металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорних станцій [1, 2].

Динамічне балансування металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів на балансувальних верстатах в умовах газокompресорної станції занадто трудомістке, особливо для тих агрегатів, що характеризуються підвищеними вібраціями вузлів після монтажу [3]. Як правило, металеві тіла обертання (ротори) газоперекачувальних агрегатів показують на балансувальних верстатах нестабільні амплітуди коливань [4, 5], які в значній мірі залежать від температури шийок, стану мастильного шару, температури повітря приміщення, наявності протягів [6, 7]. Тривала робота металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорних станцій з залишковими неврівноваженими масами викликає інтенсивний знос півмуфт сполучених роторів [8, 9], руйнування лопаточного апарату, ослаблення кріплення і інші побічні явища, що знижують моторесурс агрегату [9, 10].

Мета роботи – охарактеризувати динамічну неврівноваженість металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорної станції.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій. Як відомо [2, 4] динамічна неврівноваженість металевих тіл обертання характеризується наявністю як статичної, так і моментної неврівноваженості, коли відмінні від нуля і головний вектор дисбалансів і головний момент дисбалансів. При динамічній неврівноваженості металевих тіл обертання вісь їх обертання і одна з головних осей інерції або перетинаються поза центром мас, або перехрещуються в просторі.

Металеві тіла обертання, що мають великі кутові швидкості, повинні бути добре врівноважені щоб уникнути биття, вібрації, порушення центрування і підвищення навантаження на опорні деталі [10, 11].

Металеві тіла обертання більшості відомих машин на робочих частотах можна розглядати як жорсткі і застосовувати до них методи динамічного балансування, регламентовані ГОСТ ІСО 1940-1. Дані методи передбачають усунення головного вектора дисбалансів – установкою корегуючої маси в одній площині корекції, і усунення головного моменту дисбалансів – розподілом мас у двох площинах корекції. Також застосовується і ГОСТ 31320, який передбачає кілька методів динамічного балансування [2, 8].

При аналізі динамічної поведінки металевих тіл обертання (насамперед, роторів) газоперекачувальних агрегатів газокompресорних станцій і оцінці можливості виникнення критичних (резонансних) режимів необхідно враховувати, що на власні частоти ротора (а значить, і на його критичні швидкості) вносить особливий вплив двояка жорсткість вала, мала згинальна жорсткість консолей з робочими колесами, а також, в доповненні до них, розтягуюча сила в осьовому напрямку, викликана дією в різних напрямках на робочі колеса газодинамічного навантаження, що залежить від частоти обертання. Однак всі ці фактори можуть бути враховані тільки в моделі гнучкого ротора. Крім того, при аналізі процесів, що відбуваються в роторній машині, також слід розділяти поняття критичної швидкості і резонансу. Перше, пов'язане з втратою стійкості обертового ротора під дією збудження через власну невірноваженість [11–15]. Але в багатовальних турбомашинах коливання одного ротора можуть бути викликані невірноваженістю іншого [2, 16, 17]. Такі коливання, на відміну від критичних, називають резонансними [18].

Оскільки будь-яка роторна машина передбачає наявність обертових елементів, то це завжди буде призводити до наявності гармонійних навантажень і вібрацій, викликаних ними. Рівень цих вібрацій буде залежати від багатьох факторів, основними з яких є невірноваженість вала і навісних елементів, конструктивні особливості і технологічні чинники, і може привести до негативних наслідків аж до руйнування. Тому питанням зниження віброактивності завжди приділяється підвищена увага як при проектуванні роторної машини, так при її доведенні та експлуатації [12, 14].

Отже, роторні машини, як і будь-які інші складні технічні динамічні системи, схильні до дії вібрацій [15], обумовлених конструкцією, режимами роботи, впливом недосконалостей виконання. Вони являють собою складний коливальний процес з широким спектром частот і розкидом амплітуд, що згубно, а в деяких випадках – і руйнівний вплив на елементи машин. Причини вібрацій роторних систем можна розділити на кілька груп [15–19]: вібрації через невірноваженість металевих тіл обертання; вібрації, породжувані конструктивними особливостями металевих тіл обертання; вібрації, порушувані газодинамічними чинниками; вібрації електромагнітного походження; підшипникові вібрації. Перший тип вібрацій – це головний і неминучий вид вібрацій будь-яких металевих тіл обертання. Невірноважені металеві тіла обертання завжди роблять коливання з основною частотою, тобто з частотою обертання ротора ω . Причому, виникаючі при цьому відцентрові сили можуть викликати не тільки вертикальні і горизонтальні вібрації, а й за певних умов – осьові [14, 20].

Для умови довгострокової та надійної роботи газоперекачувальних агрегатів газокompресорних станцій необхідно забезпечити низькі значення допустимих вібрацій компресорних агрегатів, тобто необхідне виконання високих вимог до них. Наприклад, відповідно до стандарту API 617, величина розмаху амплітуд для випадку вібраційних переміщень ротору при частоті обертання в 12000 об/хв не повинна бути більшою 25 мкм [8, 21]. Такі вимоги можна забезпечити за допомогою наявних запасів по

відстроюванню величин критичної частоти в залежності від значень робочої частоти обертання роторів, тобто такі значення повинні бути закладені під час проектувальних робіт, та за допомогою високоточного балансування металевих тіл обертання для всіх значень робочих частот обертання.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблеми. До теперішнього моменту для виявлення динамічної невірноваженості металевих тіл обертання для наступного їх балансування використовувався метод коефіцієнтів впливу, в якому не враховувався вектор дійсних і уявних комплексних параметрів амплітуди вібрації при нульовому пуску обертових машин. Це призводило до нижчої точності балансування металевих тіл обертання, в результаті якого підвищувались вібраційні навантаження.

Формулювання цілей статті. У роботі на основі удосконаленого метода балансування роторів за динамічними коефіцієнтами впливу необхідно дослідити динамічну невірноваженість металевих тіл обертання нагнітача Н-6-56 діючого газоперекачувального агрегату газокompресорної станції змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 для здійснення контролю розвитку їх коливальних процесів та виконати їх балансування для забезпечення безаварійної роботи газокompресорних станцій.

Висвітлення основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставлених цілей статті застосуємо запропонований метод у роботах [11, 21], що призначений для балансування роторів газоперекачувальних агрегатів газокompресорних станцій за динамічними коефіцієнтами впливу, який передбачає лінійну залежність між комплексними амплітудами $\bar{Y}_m$ та дисбалансами $\bar{D}_n$, яка визначається наступним комплексним відношенням:

$$\begin{cases} \bar{Y}_1 = \bar{W}_{11}\bar{D}_1 + \bar{W}_{12}\bar{D}_2 + \dots + \bar{W}_{1l}\bar{D}_l, \\ \bar{Y}_2 = \bar{W}_{21}\bar{D}_1 + \bar{W}_{22}\bar{D}_2 + \dots + \bar{W}_{2l}\bar{D}_l, \\ \dots \dots \dots \\ \bar{Y}_k = \bar{W}_{k1}\bar{D}_1 + \bar{W}_{k2}\bar{D}_2 + \dots + \bar{W}_{kl}\bar{D}_l, \\ \dots \dots \dots \end{cases} \quad (1)$$

де $\bar{W}_{mn}, (m=1, k; n=1, l)$ – комплексні коефіцієнти впливу; k – число точок вимірювання. При балансуванні на балансувальному верстаті – вібрації вимірюються тільки в площинах опор, тому $k = 2 \cdot i_{sk}$, де i_{sk} – кількість частот обертання, на яких проводяться вимірювання; l – число площин, в які встановлюються пробні вантажі.

Як відомо, приведену систему (1), без помилок, можна представити в матричній формі, у наступному вигляді:

$$\bar{\bar{Y}} = \bar{\bar{W}}\bar{\bar{D}}, \quad (2)$$

де $\bar{\bar{Y}}$ – вектор-стовпець комплексних амплітуд; $\bar{\bar{D}}$ – вектор-стовпець комплексних дисбалансів; $\bar{\bar{W}}$ – матриця $k \times l$ комплексних коефіцієнтів впливу $\bar{W}_{mn}, (m=1, k; n=1, l)$.

Припустимо, що урівноважуючу систему вантажів $\bar{D}$ можна визначити в результаті рішення системи лінійних рівнянь:

$$\bar{D} = [\bar{W}^T \bar{W}]^{-1} \bar{W}^T \bar{Y}_0, \quad (3)$$

де $\bar{Y}_0$ – вектор дійсних і уявних комплексних параметрів амплітуди вібрації при нульовому пуску.

Тоді, з впевненістю можна виконати розрахунок коригувальних вантажів, який здійснимо за результатами пробних пусків та з використанням матриці коефіцієнтів, отриманих розрахунковим шляхом.

Будемо виходити з наступного: у разі, якщо пробний коригувальний вантаж в n -й площині буде поліпшувати вібраційний стан ротора, то його можна залишити в площині корекції. Тоді, для цього випадку, динамічні коефіцієнти впливу для наступних пробних коригувальних вантажів будуть визначатися за амплітудами вібрації при n -му пуску тощо.

Припускаючи повну обґрунтованість теоретичних аспектів, у роботі проведено дослідження нагнітача Н-6-56 діючого газоперекачувального агрегату газокompресорної станції змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7. Експериментальні значення динамічних коефіцієнтів впливу для даного ротору в площинах корекції на першому і другому робочих колесах, а також півмуфті і упорному диску наведені на рис. 1 і 2. Для забезпечення нормативно-встановленого рівня точності вимірювань, було застосовано апаратуру контролю вібрацій ІВ-Д-ПФ-15, усі характеристики якої, як блок-схема вимірювань, габаритно-монтажні розміри віброперетворювача тощо приведені в [22].

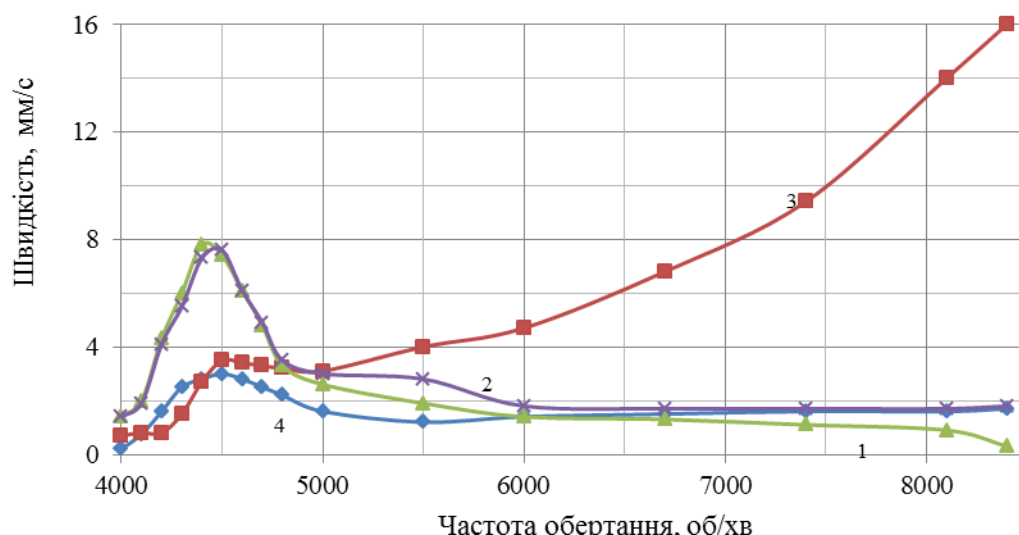


Рисунок 1 – Експериментальні значення динамічних коефіцієнтів впливу на передній опорі ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56 в площинах корекції:
1 – на першому робочому колесі; 2 – на другому робочому колесі; 3 – на півмуфті;
4 – на упорному диску

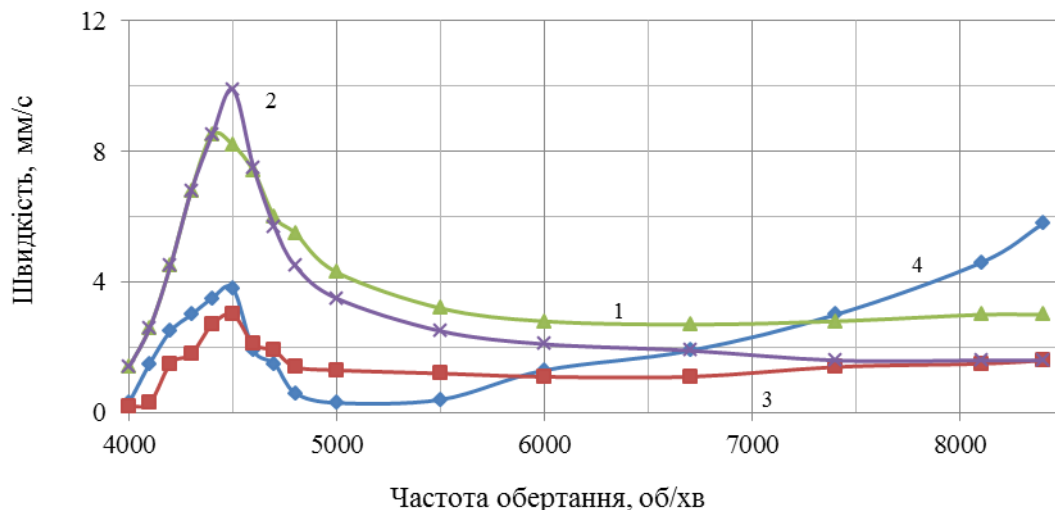


Рисунок 2 – Експериментальні значення динамічних коефіцієнтів впливу на задній опорі ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56 в площинах корекції:
1 – на першому робочому колесі; 2 – на другому робочому колесі; 3 – на півмуфті;
4 – на упорному диску

При цьому, розмірковували таким чином, щоб балансування досліджуваних роторів змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 здійснити в площині корекції на одному з його робочих коліс (з метою усунення можливого вигину за першою формою коливань) і в площинах корекції на консольних ділянках (з метою усунення моментного дисбалансу ротора як жорсткого тіла). З результатів убачається, що для таких роторів змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 характерний малий вплив дисбалансів робочих коліс на частотах обертання вище першої критичної частоти (криві 1, 2), а також малий вплив дисбалансів консольних ділянок (крива півмуфти – 3) у межах першої критичної частоти.

Забезпечення точності і чистоти експерименту враховувався взаємовплив елементів ротору. Тобто за першою критичною частотою дисбаланси на консольних ділянках в основному впливають на ближню до них опору, а значення динамічних коефіцієнтів впливу збільшуються нелінійно зі зростанням частоти обертання. Фаза коливань за опорами істотно змінюється тільки при проходженні першої критичної частоти.

У випадку, якщо конструкція ротора не дозволяє проводити корекцію дисбалансів на одній з консольних ділянок, для прикладу, упорний диск знаходиться близько до однієї з опор – то він використовується в якості площині корекції. Тому значення динамічних коефіцієнтів впливу від дисбалансів у робочому діапазоні частот обертання теж в основному впливають на ближню до них опору, тільки ця залежність практично лінійна (криві 4 на рис. 1, 2). Для роторів змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 виявляється достатнім врівноваження на двох частотах обертання: в межах першої критичної частоти і на максимальній робочій частоті обертання. При високій точності урівноваження (залишкові вібрації опор у всьому діапазоні розгону надходять

до значень 0,2-0,5 мм/с) ротор виявляється врівноваженим і як тверде тіло, відповідно до третього класу точності згідно з ГОСТ 22061-76 або ISO 1940.

У роботі виконано балансування роторів змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 за отриманими експериментальними динамічними коефіцієнтами впливу і за значеннями матриці коефіцієнтів впливу $\overline{W}$, а далі, використовуючи розрахункові та експериментальні матриці динамічних коефіцієнтів впливу, для вихідного стану роторів визначалися врівноважуючі системи вантажів.

Для ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56 в якості площин корекції були використані: півмуфта, робоче колесо другого ступеня і упорний диск. Результати розрахунку врівноважуючих систем наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Коригувальні системи вантажів ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56

Площина корекції	Експериментальні значення динамічних коефіцієнтів впливу		Теоретичні значення динамічних коефіцієнтів впливу		Похибка	
	Дисбаланс, кг·м	Кут, градус	Дисбаланс, кг·м	Кут, градус	Дисбаланс, %	Кут, градус
півмуфта	0,00495	152	0,00497	151	-0,4	1
2 колесо	0,1126	4	0,1082	0	3,9	4
упорний диск	0,00816	171	0,00812	174	0,5	-3

Як видно з табл. 1 похибка визначення коригувальних вантажів знаходиться в межах 4 %, а кутове відхилення становить – не більше 4 градусів. Тобто похибки становлять допустимі значення в межах експерименту по балансуванню ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56.

На рис. 3 наведено початковий стан (крива 1) і результати балансування ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7. Використовуючи отримані результати для балансування за допомогою врівноважуючих систем вантажів, були визначені очікувані залишкові вібрації опор, розраховані за експериментальними динамічними коефіцієнтами впливу, при установці на ротор змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 теоретичної (крива 2) і експериментальної (крива 3) системи вантажів.

Як видно з рис. 3 в робочому діапазоні частот (6100-8600 об/хв), різниця в модулях очікуваних вібрацій при установці на ротор змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 системи вантажів складає не більше 0,3 мм/с, а в межах першої критичної частоти – не більше 0,5 мм/с, при допустимих рівнях вібрації в 1,8 мм/с.

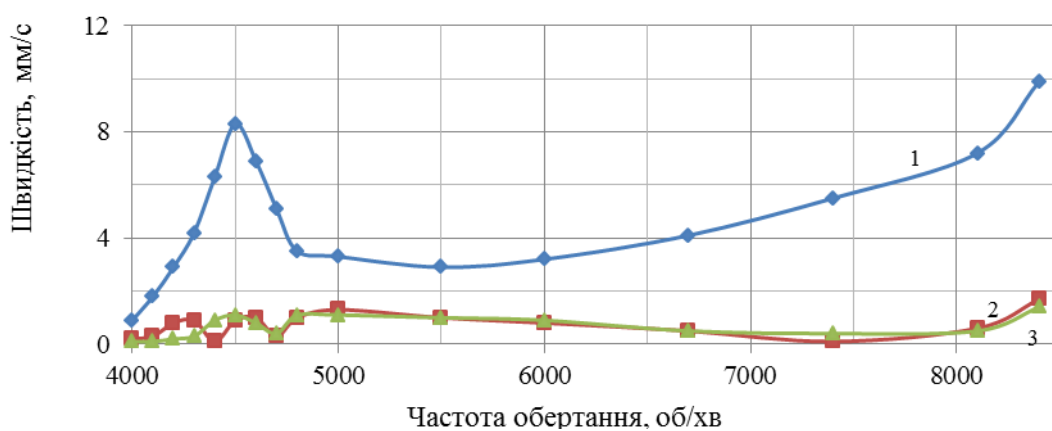
З отриманих результатів випливає, що для гнучких роторів, що працюють поблизу першої критичної частоти, балансування можна проводити на підставі розрахункових значень динамічних коефіцієнтів впливу без пробних пусків.

Висновки. У роботі охарактеризована динамічна невірноваженість металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорної станції, яка проявляється в наявності як статичної, так і моментної невірноваженості, коли відмінні від нуля і головний вектор дисбалансів і головний момент дисбалансів. При динамічній невірноваженості металевих тіл обертання вісь їх обертання і одна з

головних осей інерції або перетинаються поза центром мас, або перехрещуються в просторі.

Також у роботі досліджено процес контролю динамічної неврівноваженості металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорних станцій на основі удосконаленого метода балансування роторів за динамічними коефіцієнтами впливу, який представлено в матричній формі, та за допомогою вектору дійсних і уявних комплексних параметрів амплітуди вібрації при нульовому пуску. У результаті отримання розрахункової та експериментальної матриці динамічних коефіцієнтів впливу для вихідного стану металевих тіл обертання змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56 були визначені врівноважуючі системи вантажів та виконане їх балансування для забезпечення безаварійної роботи газокompресорних станцій. При цьому, в якості площин корекції були використані: півмуфта, робоче колесо і упорний диск. Результати показали, що похибка визначення коригувальних вантажів за удосконаленим методом знаходиться в межах 4%, а кутове відхилення становить – не більше 4 градусів. Тобто похибки не перевищують допустимі значення в межах експерименту по балансуванню ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56.

Результати балансування металевих тіл обертання на основі удосконаленої методики показали, що вони нижче допустимих рівнів вібрації в 3,6...6,0 рази. Тобто удосконалений метод балансування роторів за динамічними коефіцієнтами впливу, який представлено в матричній формі, та за допомогою вектору дійсних і уявних комплексних параметрів амплітуди вібрації при нульовому пуску є кращим у порівнянні з існуючими методами.



а

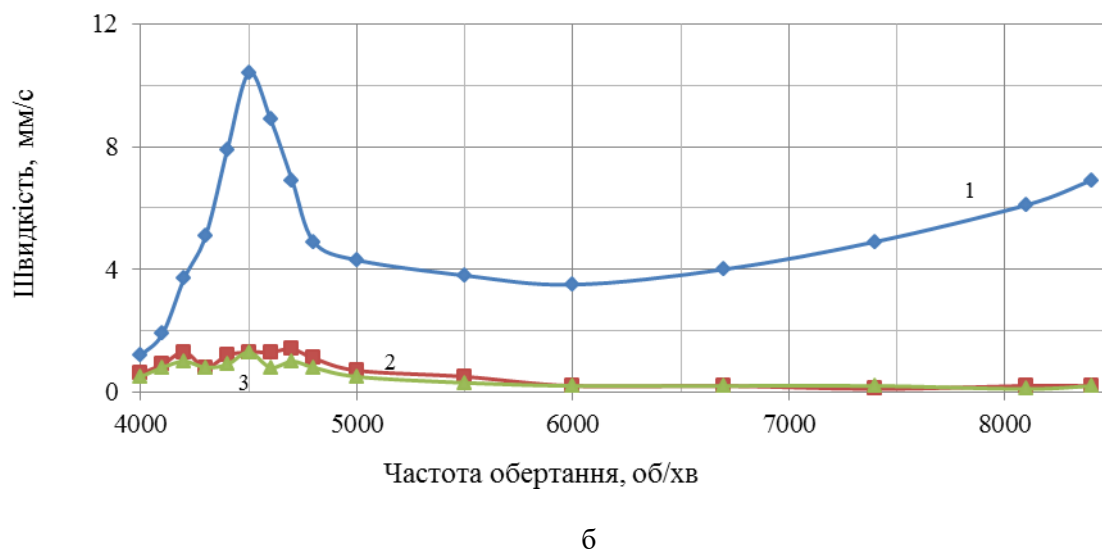


Рисунок 3 – Результати балансування ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56: а – передня опора; б – задня опора

Література

1. Вплив факторів роботи газоперекачувальних агрегатів на їх напрацювання / М.І. Горбійчук, Б.В. Копей, А. Беллауар, І.В. Щупак // Нафтогазова енергетика. – 2008. – № 3(8). – С. 55–58.
2. Копей, Б.В. Використання вібродіагностики для виявлення дефектів шатунних підшипників газомотокомпресорів 10ГКН / Б. В. Копей, С. І. Галій, Н. Б. Михайликова // Нафтогазова енергетика. – 2011. – № 1. – С. 50–56.
3. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed. by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2012. – Vol. 18. – 427 p.
4. Burch, John Gand Strater, Felix R. Information systems: Theory and practice. – Santa Barbara; Hamilton, 2014. – 494 p.
5. Distributed parameter control systems: Teory and application / Ed. By S.G. Tzafestas. – Oxford a.o.: Pergamon Press, 2014. – 497 p.
6. Особенности динамических взаимодействий в системах с расширенным набором типовых элементов / Д.Н. Насников, Е.А., Паршута, А.Н. Трофимов, В.В. Сорин // Вестник Иркутского регионального отделения Академии наук Высшей школы. – Иркутск. – 2010. – Вып. 2(17). – С. 170–186.
7. Елисеев С.В. Сочленения звеньев в динамике механических колебательных систем : монография / С. В. Елисеев, Ю. В. Ермошенко; Федеральное агентство ж.д. трансп., ФГБОУ ВПО "Иркутский гос. ун-т путей сообщ.". – Иркутск : ИрГУПС, 2012. – 155 с.
8. Корольков М.В. Разработка и исследование аналитических моделей динамики механизмов с зазорами в сопряжениях деталей : диссертация ... канд. тех. наук : 05.02.02 / М.В. Корольков; Место защиты: Моск. гос. автомобил.-дорож. ин-т (техн. ун-т)]. – Б.м., Б.г. – 176 с.
9. Ланда П.С. Нелинейные колебания и волны / П. С. Ланда. – Москва : Наука : Изд. фирма "Физ.-мат. лит.", 2010. – 552 с.

10. Lingaitis L. P. Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines / L. P. Lingaitis, S. V. Myamlin, D. M. Baranovsky, V. Jastremskas // Maintenance and Reliability. – 2012. Vol. 14 (2). – P. 154–159.
11. Bentley D.E. Fundamentals of rotating machinery diagnostics / D.E. Bentley, C.T. Hatch, B. Grissom. – Minden, NV: Bentley Pressurized Bearing Press, 2002. – 726 p.
12. Кельзон А.С. Расчет и конструирование роторных машин / А.С. Кельзон, Ю.Н. Журавлев, Н.В. Январев. – Л.: Машиностроение, 1977. – 288 с.
13. Кельзон А.С. Динамика роторов в упругих опорах / А.С. Кельзон, Ю.П. Циманский, В.И. Яковлев. – М.: Наука, 1982. – 280 с.
14. Липсман С.И. Предупреждение и устранение вибрации роторных машин / С.И. Липсман, А.Т. Музыка, В.С. Липсман. – К.: Техніка, 1968. – 196 с.
15. Вибрации в технике: [справ.]. В 6-ти т. – Т. 3: Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1980. – 543 с.
16. Вибрации роторных систем / К.М. Рагульскис, Р.А. Ионушас, А.К. Бакшис и др. – Вильнюс: Мокслас, 1976. – 232 с.
17. Вибрации подшипников / К.М. Рагульскис, А.Ю. Юркаускас, В.В. Атступенас и др. – Вильнюс: Минтис, 1974. – 392 с.
18. Гольдин А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. – М.: Машиностроение, 1999. – 344 с.
19. Барков А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб.: СПбГМТУ, 2000. – 169 с.
20. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандратский. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 4: Динамика и прочность авиационных двигателей и энергетических установок. – 204 с.
21. Тессаржик Д. Применение коэффициентов влияния для экспериментальной оценки балансировки гибких роторов по методу дискретных сечений при заданных скоростях и методу наименьших квадратов / Д. Тессаржик, Р. Бэдгли // Конструирование и технология машиностроения. – 1974. – № 2. – С. 254–265.
22. Аппаратура контроля вибрации ИВ-Д-ПФ-15. Руководство по эксплуатации ЖЯИУ.421431.001-72 РЭ. – 2008. – 109 с.

Bibliography (transliterated)

1. Vplyv faktoriv roboty hazoperekachuvalnykh ahrehativ na yikh napratsiuvannia / M.I. Horbiichuk, B.V. Kopei, A. Bellauar, I.V. Shchupak // Naftohazova enerhetyka. – 2008. – № 3(8). – P. 55–58.
2. Kopei, B.V. Vykorystannia vibrodiahnostyky dlia vyivlennia defektiv shatunnykh pidshypnykiv hazomotokompresoriv 10HKN / B.V. Kopei, S.I. Halii, N.B. Mykhailykova // Naftohazova enerhetyka. – 2011. – № 1. – P. 50–56.
3. Control and dynamic systems: Advances in theory and applications / Ed. by C.T. Leondes. – N.Y.a.o.: Acad Press, 2012. – Vol. 18. – 427 p.
4. Burch, John Gand Strater, Felix R. Information systems: Theory and practice. – Santa Barbara; Hamilton, 2014. – 494 p.
5. Distributed parameter control systems: Teory and application / Ed. By S.G. Tzafestas. – Oxford a.o.: Pergamon Press, 2014. – 497 p.

6. Osobennosti dinamicheskikh vzaimodejstvij v sistemah s rasshirennym naborom tipovykh jelementov / D.N. Nasnikov, E.A., Parshuta, A.N. Trofimov, V.V. Sorin // Vestnik Irkutskogo regional'nogo otdelenija Akademii nauk Vysshej shkoly.). – Irkutsk. – 2010. – Vyp. 2(17). – P. 170–186.

7. Eliseev S.V. Sochlenenija zven'ev v dinamike mehanicheskikh kolebatel'nyh sistem : monografija / S.V. Eliseev, Ju.V. Ermoshenko; Federal'noe agentstvo zh.d. transp., FGBOU VPO "Irkutskij gos. un-t putej soobshh.". – Irkutsk : IrGUPS, 2012. – 155 p.

8. Korol'kov M.V. Razrabotka i issledovanie analiticheskikh modelej dinamiki mehanizmov s zazorami v soprjazhenijah detalej : dissertacija ... kand. teh. nauk : 05.02.02 / M.V. Korol'kov; Mesto zashhity: Mosk. gos. avtomobil.-dorozh. in-t (tehn. un-t)]. – B.m., B.g. – 176 p.

9. Landa P.S. Nelinejnye kolebanija i volny / P.S. Landa. – Moskva : Nauka : Izd. firma "Fiz.-mat. lit.", 2010. – 552 p.

10. Lingaitis L.P. Prediction methodology of durability of locomotives diesel engines / L.P. Lingaitis, S.V. Myamlin, D.M. Baranovsky, V. Jastremskas // Maintenance and Reliability. – 2012. Vol. 14 (2). – P. 154–159.

11. Bentley D.E. Fundamentals of rotating machinery diagnostics / D.E. Bentley, C.T. Hatch, B. Grissom. – Minden, NV: Bentley Pressurized Bearing Press, 2002. – 726 p.

12. Kel'zon A.S. Raschet i konstruirovanie rotornyh mashin / A.S. Kel'zon, Ju.N. Zhuravlev, N.V. Janvarev. – L.: Mashinostroenie, 1977. – 288 p.

13. Kel'zon A.S. Dinamika rotorov v uprugih oporah / A.S. Kel'zon, Ju.P. Cimanskij, V.I. Jakovlev. – M.: Nauka, 1982. – 280 p.

14. Lipsman S.I. Preduprezhdenie i ustranenie vibracii rotornyh mashin / S.I. Lipsman, A.T. Muzyka, V.S. Lipsman. – K.: Tehnika, 1968. – 196 p.

15. Vibracii v tehnikе: [sprav.]. V 6-ti t. – T. 3: Kolebanija mashin, konstrukcij i ih jelementov / Pod red. F.M. Dimentberga i K.S. Kolesnikova. – M.: Mashinostroenie, 1980. – 543 p.

16. Vibracii rotornyh sistem / K.M. Ragul'skis, R.A. Ionushas, A.K. Bakshis i dr. – Vil'njus: Mokslas, 1976. – 232 p.

17. Vibracii podshipnikov / K.M. Ragul'skis, A.Ju. Jurkauskas, V.V. Atstupenas i dr. – Vil'njus: Mintis, 1974. – 392 p.

18. Gol'din A.S. Vibracija rotornyh mashin / A.S. Gol'din. – M.: Mashinostroenie, 1999. – 344 p.

19. Barkov A.V. Monitoring i diagnostika rotornyh mashin po vibracii / A.V. Barkov, N.A. Barkova, A.Ju. Azovcev. – SPb.: SPbGMTU, 2000. – 169 p.

20. Inozemcev A.A. Osnovy konstruirovaniya aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok / A.A. Inozemcev, M.A. Nihamkin, V.L. Sandratskij. – M.: Mashinostroenie, 2008. – T. 4: Dinamika i prochnost' aviacionnyh dvigatelej i jenergeticheskikh ustanovok. – 204 p.

21. Tessarzhik D. Primenenie koeficientov vlijanija dlja jeksperimental'noj ocenki balansirovki gibkikh rotorov po metodu diskretnyh sechenij pri zadannyh skorostjah i metodu naimen'shikh kvadratov / D. Tessarzhik, R. Bjedgli // Konstruirovanie i tehnologija mashinostroenija. – 1974. – № 2. – P. 254–265.

22. Apparatura kontrolja vibracii IV-D-PF-15. Rukovodstvo po jekspluatacii ZhJaIU.421431.001-72 RJe. – 2008. – 109 p.

УДК 621:658.562.3/6

Фоменко Д.С., аспірант, Костенко В.Л., доктор технічних наук, професор

Одеський національний політехнічний університет

ДИНАМІЧНА НЕВРІВНОВАЖЕНІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ТІЛ ОБЕРТАННЯ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ ГАЗОКОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

У статті охарактеризована динамічна невірноваженість металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорної станції, яка проявляється в наявності як статичної, так і моментної невірноваженості, коли відмінні від нуля і головний вектор дисбалансів і головний момент дисбалансів. При динамічній невірноваженості металевих тіл обертання вісь їх обертання і одна з головних осей інерції або перетинаються поза центром мас, або перехрещуються в просторі. Також у статті досліджено процес контролю динамічної невірноваженості металевих тіл обертання газоперекачувальних агрегатів газокompресорних станцій на основі удосконаленого метода балансування роторів за динамічними коефіцієнтами впливу, який представлено в матричній формі, та за допомогою вектору дійсних і уявних комплексних параметрів амплітуди вібрації при нульовому пуску. У результаті отримання розрахункової та експериментальної матриці динамічних коефіцієнтів впливу для вихідного стану металевих тіл обертання змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56 були визначені врівноважуючі системи вантажів та виконане їх балансування для забезпечення безаварійної роботи газокompресорних станцій. При цьому, в якості площин корекції були використані: півмуфта, робоче колесо і упорний диск. Результати показали, що похибка визначення коригувальних вантажів за удосконаленим методом знаходиться в межах 4 %, а кутове відхилення становить – не більше 4 градусів. Тобто похибки не перевищують допустимі значення в межах експерименту по балансуванню ротора змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 нагнітача Н-6-56. Також встановлено, що в робочому діапазоні частот (6100-8600 об/хв), різниця в модулях очікуваних вібрацій при установці на ротор змінної проточної частини СПЧ Н-6-25-1,7 системи вантажів складає не більше 0,3 мм/с, а в межах першої критичної частоти – не більше 0,5 мм/с, при допустимих рівнях вібрації в 1,8 мм/с. Результати балансування металевих тіл обертання на основі удосконаленої методики показали, що вони нижче допустимих рівнів вібрації в 3,6...6,0 рази. Тобто удосконалений метод балансування роторів за динамічними коефіцієнтами впливу, який представлено в матричній формі, та за допомогою вектору дійсних і уявних комплексних параметрів амплітуди вібрації при нульовому пуску є кращим у порівнянні з існуючими методами.

Ключові слова: динамічна невірноваженість, металеві тіла обертання, газоперекачувальні агрегати, газокompресорні станції.

УДК 621:658.562.3/6

Фоменко Д. С., аспирант, Костенко В.Л., доктор технических наук, профессор

Одесский национальный политехнический университет

ДИНАМИЧЕСКАЯ НЕУРАВНОВЕШЕННОСТЬ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ГАЗОКОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

В статье описана динамическая неуравновешенность металлических тел вращения газоперекачивающих агрегатов газокompрессорной станции, которая проявляется в наличии как статической, так и моментной неуравновешенности, когда отличны от нуля и главный вектор дисбалансов, и главный момент дисбалансов. При динамической неуравновешенности металлических тел вращения ось их вращения и одна из главных осей инерции или пересекаются вне центра масс, или перекрещиваются в пространстве. Также в статье исследован процесс контроля динамической неуравновешенности металлических тел вращения газоперекачивающих агрегатов газокompрессорных станций на основе усовершенствованного метода балансировки роторов по динамическим коэффициентам влияния, представленного в матричной форме и вектором действительных и мнимых комплексных параметров амплитуды вибрации при нулевом пуске. В результате получения расчетной и экспериментальной матрицы динамических коэффициентов влияния для исходного состояния металлических тел вращения переменной проточной части СПЧ Н-6-25-1,7 нагнетателя Н-6-56 были определены уравновешивающие системы грузов и выполнено их балансировку для обеспечения безаварийной работы газокompрессорных станций. При этом, в качестве плоскостей коррекции были использованы: полумуфты, рабочее колесо и упорный диск. Результаты показали, что погрешность определения корректирующих грузов по усовершенствованному методу находится в пределах 4 %, а угловое отклонение составляет - не более 4 градусов. То есть погрешности не превышают допустимые значения в рамках эксперимента по балансировке ротора переменной проточной части СПЧ Н-6-25-1,7 нагнетателя Н-6-56. Также установлено, что в рабочем диапазоне частот (6100-8600 об / мин), разница в модулях ожидаемых вибраций, при установке на ротор переменной проточной части СПЧ Н-6-25-1,7 системы грузов, составляет не более 0,3 мм / с, а в пределах первой критической частоты - не более 0,5 мм / с, при допустимых уровнях вибрации в 1,8 мм / с. Результаты балансировки металлических тел вращения на основе усовершенствованной методики показали, что они ниже допустимых уровней вибрации в 3,6...6,0 раз. То есть усовершенствованный метод балансировки роторов по динамическим коэффициентам влияния, который представлен в матричной форме и вектором действительных и мнимых комплексных параметров амплитуды вибрации при нулевом пуске является предпочтительным по сравнению с существующими методами.

Ключевые слова: динамическая неуравновешенность, металлические тела вращения, газоперекачивающие агрегаты, газокompрессорные станции.

Fomenko D., Kostenko V.

Odessa National Polytechnic University

DYNAMIC UNBALANCE OF METAL BODIES OF REVOLUTION OF GAS-COMPRESSOR UNITS OF GAS-COMPRESSOR STATION

The article describes the dynamic imbalance of the metal bodies of rotation of the gas pumping units of the gas compressor station, which is manifested in the presence of both static and momentary imbalance, when the main vector of imbalances and the main moment of imbalances are different from zero. With dynamic unbalance of metal bodies of revolution, the axis of their rotation and one of the main axes of inertia either intersect outside the center of mass or intersect in space. The article also studies the process of controlling the dynamic

imbalance of metal bodies of rotation of gas pumping units of gas compressor stations based on an improved method of balancing rotors according to dynamic coefficients of influence presented in matrix form and with a vector of real and imaginary complex parameters of vibration amplitude at zero start. As a result of obtaining the calculated and experimental matrix of dynamic influence coefficients for the initial state of metallic bodies of rotation of the variable flow part of the SPCh N-6-25-1.7 of the supercharger N-6-56, the balancing systems of the loads were determined and they were balanced to ensure trouble-free operation of gas compressor stations. In this case, as the correction planes were used: coupling halves, impeller and thrust disk. The results showed that the error in determining corrective weights by the improved method is within 4%, and the angular deviation is no more than 4 degrees. That is, the errors do not exceed the permissible values in the experiment on balancing the rotor of the variable flow part of the SPCh N-6-25-1.7 of the N-6-56 supercharger. It was also found that in the working frequency range (6100-8600 rpm), the difference in the modules of expected vibrations, when the variable flow part of the SPCh N-6-25-1.7 system of loads is installed on the rotor, is not more than 0.3 mm / s, and within the first critical frequency - no more than 0.5 mm / s, with permissible vibration levels of 1.8 mm / s. The results of balancing metal bodies of revolution based on an improved technique showed that they are 3.6-6.0 times lower than the permissible vibration levels. That is, an improved method of balancing rotors according to dynamic coefficients of influence, which is presented in a matrix form and a vector of real and imaginary complex parameters of the vibration amplitude at zero start, is preferable to existing methods.

Keywords: dynamic unbalance, metal bodies of rotation, gas pumping units, gas compressor stations.

УДК 519.63+621.9.048

Мохаммед Алтагер Албаршеши, директор інституту,
Алкіб Ахмед М. Мохаммед Алджалі, PhD, викладач кафедри оптики,
Нагла Фаєз Аллабаг, викладач кафедри фізики

Вищий інститут науки і техніки (Тріполі, Лівія)

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК В ГАЛУЗІ ПЛАЗМОВОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ТА ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВІДХОДІВ

Ключові слова: електродуговий генератор плазми, переробка твердих побутових відходів, плазмова газифікація, синтез-газ.

Вступ. У зв'язку із зростаючим дефіцитом паливно-енергетичних ресурсів, зокрема вугілля антрацитової групи, виникає необхідність у збільшенні ефективності використання цього виду палива і зниження викидів у довкілля [1]. Сукупність заходів з підвищення рентабельності енергосекторів, а також зниження навантаження на екосистему може включати такі заходи:

1. Модернізацію технологічних процесів спалювання вугілля. Існуючі вже багато десятиріч років технології спалювання вугілля не відповідають сучасним вимогам, оскільки перевищують допустимий рівень забруднення атмосфери твердими вуглецевими частинками і оксидами азоту. Крім того, через неповне згоряння вугільних частин існує небезпека зараження ґрунту від викидів золи і шлаків.

2. Перероблення золо-шлакового залишку на теплоелектростанціях. Близько 70 % усієї електроенергії України виробляється на теплоелектростанціях. На сьогодні вся сукупність відходів теплоелектростанцій складається без подальшої переробки, хоча практика розвинених західних країн показує перспективність і економічну ефективність упровадження технологій перероблення шлаків.

3. Газифікацію твердих побутових відходів (ТПВ) і біомаси. Питання перероблення ТПВ в Україні на сьогодні стоїть найгостріше, оскільки в основному відходи складаються, а не переробляються. За статистикою більше 5 % площі території України зайнята звалищами, загальна кількість накопиченого сміття – 32,4 млрд. тонн. На сьогодні в країні працює лише 4 заводи для переробки сміття, з яких тільки один завантажений на 100 %.

Хімічний аналіз зольного залишку відвалів ТЕС України показує високий процентний вміст незгорілого вугілля – 20 %, а також феросилікату 40 %. Золівідвали більшості ТЕС заповнені на 90 % при цьому щорічно реалізують лише 5 % золошлаку, тоді як сумарна кількість вугільних відходів обчислюється мільйонами тонн на рік при середній вартості золошлаку 70 грн за тонну. З урахуванням кількості ТЕС перероблення їхніх відходів може дати істотний економічний ефект.

Мета роботи. Підкреслити актуальність і перспективність застосування плазмових технологій для перероблення відходів і газифікації сировини в сучасних умовах та необхідність вдосконалення методів проектування електродугових генераторів плазми, зокрема інтегрованих в установки газифікації сировини.

Основна частина. Одним з доказів позитивного ефекту від упровадження технологій газифікації ТПВ може служити статистика ринку використання відходів, зокрема приклад успішного енергоменеджменту в Швеції, де за рахунок перероблення сміття забезпечується 20 % свого енергобалансу. Для цього країна щорічно імпортує 800 тис. т сміття, перетворивши його в цінний для суспільства ресурс.

Окремою проблемою є знищення небезпечних відходів, зокрема хімічних добрив і пестицидів з вичерпаним терміном зберігання, відходів хімічного виробництва, медичних відходів та інших типів відходів з особливими умовами зберігання або переробки [1–3]. Сучасний світовий досвід показує, що всі ці завдання можуть бути вирішені на основі плазмових технологій. Незаперечною перевагою таких технологій є:

- можливість керування складом продуктів переробки за винятком утворення небезпечних речовин;

- висока швидкість хімічних реакцій і збільшена глибина перероблення сировини завдяки високим температурам у плазмових реакторах;

- компактність плазмового обладнання і допоміжних систем газоочищення.

Технології плазмової газифікації ТПВ відносно давно присутні на ринку. Досвід експлуатації дослідних, потім і промислових установок плазмової газифікації дозволив установити такі ключові переваги цих технологій:

- здатність обробляти більш широкий спектр відходів, ніж більшість інших технологій;

- можливість економічно вигідного застосування при меншому, ніж для конкурентних підходів, обсязі переробки;

- утворення склоподібних твердих залишків на відміну від золи у термічних процесах, що спрощує їх повторне використання або видалення;

- більш повне перероблення відходів з меншим ризиком для здоров'я людей і краща екологічна ефективність;

- можливість одержання синтез-газу високої чистоти, що спрощує його використання в енергоустановках (газових двигунах, турбінах, паливних елементах) або виробництві хімікатів і палива.

Плазмова газифікація здійснюється в умовах недостатності кисню, що призводить до виробництва синтез-газу, осклованого шлаку і розплавленого металу, пропорції та склад яких залежать від складу вхідних відходів [4, 5].

Головним чинником розвитку такого типу процесу є можливість відновлювати гази, багаті на хімічну енергію, які можуть бути використані в системах високоефективного відновлення енергії або використовуватися як хімічна сировина.

Прикладом такого роду процесу може служити технологія плазмової газифікації ТПВ Recovered Energy System фірми Recovered Energy, Inc. (США). В цьому процесі з однієї тонни ТПВ виробляється більше 1 МВт·год електроенергії.

Крім електроенергії в ході процесу переробки отримують метал, осклований шлак, соляну кислоту й інші продукти. Після переробки не утворюється ніяких викидів і відходів, що підлягають складуванню.

Одним з лідерів у галузі плазмової газифікації є канадська компанія AlterNRG, яка просуває власну технологію плазмової газифікації (отриману через придбання компанії Westinghouse Plasma Corporation). Основою процесу AlterNRG/WPC є реактор з плазмотронами пасивного типу, який за конструкцією є стандартною вертикальною шахтною пічкою типу, зазвичай використовується в ливарному виробництві. Його об-

лицьовано відповідним вогнетривким матеріалом, щоби витримувати високі внутрішні температури і агресивне середовище у реакторі.

У цьому процесі відходи не проходять через плазмовий факел. Замість цього плазмотрони використовуються для забезпечення високих температур, необхідних для сталої роботи реактора. В дизайні AlterNRG/WPC температура плазми становитиме від 5000 до 7000 °C, а температура в зоні плавлення (нижній частині реактора) – приблизно 2000 °C – набагато нижче, ніж 20000 °C процесу АРР. Фактична робоча температура є достатньою для того, щоби керувати реакціями газифікації і розщеплювати смоли і сполуки з вищою молекулярною вагою в CO і H₂.

Синтез-газ з реактора AlterNRG/WPC виходить при температурі від 890 °C до 1100 °C при атмосферному тиску. В подальшому газ очищується у багатоетапному процесі, кількість яких залежить від того, наскільки чистий газ потрібен для конкретного процесу використання і перетворення, зазначеного в кожному конкретному проекті.

У Японії за технологією WPC було побудовано три заводи для поводження з відходами. Заводи на Yoshii, Utashinai і Mihama-Mikata були побудовані Hitachi Metals за ліцензією WPC на перероблення ТПВ. Компанія AlterNRG оголосила про плани побудови газифікаційної установки на північному сході Англії з використанням плазмового реактора AlterNRG/WPC.

Провідним європейським виробником обладнання для плазмової газифікації відходів є фірма Europlasma (Франція). Вона виробляє і реалізує дугові плазмотрони пасивного типу власної розробки і системи плазмового перероблення відходів, включаючи небезпечні, за ліцензією з компанією Aerospatiale (нині EADS – Європейська аеронавігаційна оборонна і космічна компанія).

На сьогодні за технологіями Europlasma працюють чотири заводи у Японії. Крім того, у Бордо (Франція) побудовано завод для плазмового перероблення відходів, що містять азбест. Вищезгадана компанія увійшла до складу Plasco Energy Group. Демонстраційне обладнання компанії потужністю 100 тонн за день працює з перервами з літа 2007 року в Оттаві (Канада). Компанія оголосила про наміри побудови заводу з плазмової газифікації потужністю у 150 тисяч тонн на рік у Оттаві. Вона також оголосила ще три проекти в Канаді, Японії і на Багамах.

У Європі Plasco створила спільне підприємство (Hera Plasco) з іспанською компанією Hera Holdings для європейського ринку. Компанія експлуатує плазмовий пілотний завод поблизу Барселони і активно просуває технології плазмової газифікації в Європі.

Таким чином, незважаючи на великий потенціал, притаманний методам плазмової газифікації відходів, застосування цих технологій на сьогодні обмежено окремими підприємствами. Основними причинами такого положення є недостатній рівень надійності та ресурсу плазмових генераторів, що використовуються в таких установках.

Зазвичай їхній заявлений ресурс становить 1000...2000 годин безперервної роботи, але реальний ресурс в умовах, притаманних реакторам з плазмової газифікації, може визначатися не ресурсом електродів, а виникненням небажаного електричного пробиття, спричиненого високою напругою робочого струму та запиленням поверхонь і атмосфери. Зменшення робочої напруги для цих плазмотронів лише частково вирішує проблему, бо для підтримки теплової потужності призведе до збільшення сили струму, що, в свою чергу, різко знизить ресурс електродів.

Ця проблема могла би бути вирішена за рахунок використання високоресурсних

електродугових плазмотронів з термоемісійними катодами, сталими до отруєння кисневмісних газів. Але для цього необхідно дослідити і вирішити проблеми, пов'язані з інтеграцією таких плазмотронів в комплекси плазмової газифікації, зокрема, особливої призначення режимів роботи, подачі захисного і плазмоутворювального газу з обов'язковим урахуванням оснащення установок з плазмової газифікації системами газоочищення.

Однією з проблем плазмової газифікації твердих побутових відходів є неоднорідність початкової сировини і невизначеність її компонентного складу. Це призводить до того, що при плазмовій газифікації склад синтез-газу і його калорійність можуть істотно змінюватися в ході роботи. У випадку включення в промислові системи електрогенерації цей недолік може бути компенсовано адаптивним додаванням допоміжного палива, наприклад природного газу.

Установки плазмової газифікації однорідної за складом сировини – вугілля або біомаси позбавлені вказаного недоліку. В процесі плазмової газифікації можуть бути отримані гази різних складів і теплоти згоряння, придатні для широкого використання як палива в промисловості і в побуті, так і як хімічної сировини для різних синтезів, у тому числі й для отримання рідких продуктів у синтезі Фішера-Тропша [6, 7]. Існують десятки способів газифікації твердої вуглецевої сировини. Вони можуть бути систематизовані за рядом критеріїв [6–8]:

1. За станом палива в газогенераторі розрізняють спосіб газифікації в нерухомому шарі, газифікацію в киплячому шарі і газифікацію в потоці пилоподібного палива.

2. За способом підведення тепла в газогенератор процеси газифікації поділяються на автотермічні й аллотермічні. При автотермічних процесах для перебігу ендотермічних реакцій у газифікаторах спалюють частину (35...40 %) палива, що подається кисневмісними агентами.

3. За напрямом реакційних потоків способи газифікації підрозділяються на протитечійні й прямоточні. У протитечійних способах вугілля завантажуються згори, а газифікуючі агенти підводяться знизу, що забезпечує хорошу теплопередачу. У прямоточних способах вугілля подається в одному напрямі з газифікуючим агентом.

Способи газифікації поділяються також за методом видалення з газогенератора золи (у твердому або рідкому стані), за тиском процесу (нормальний і підвищений), за складом отриманого газу (енергетичний, технологічний або замітник природного газу), освоєні в промисловому масштабі способи газифікації твердого вуглецевого палива.

При автотермічних безперервних процесах температура, необхідна для нормального ходу реакції, підтримується за рахунок тепловиділення. Керування автотермічним процесом досить тісно пов'язано із стійкістю роботи газифікатора. Стан рівноваги в автотермічному процесі досягається при рівності тепла, що відводиться, і тепла, що виділяється в результаті реакції. Якщо прийняти, що реактор добре теплоізолюваний, то тепло відводитиметься тільки газами, що покидають реактор. Основною особливістю автотермічного процесу є виникнення гістерезису. Якщо при постійній швидкості подання сировини його температура зростає, то реакція запалюється при певній температурі живлення і реактор працює у верхньої стійкої робочої точки. При зниженні подачі сировини реактор продовжує працювати з високою мірою перетворення до тих пір, поки не настає загасання при температурі живлення.

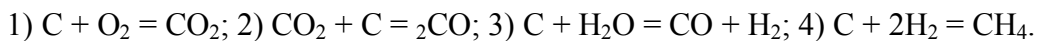
Аллотермічні процеси – це процеси, при яких необхідне тепло підводиться ззовні, за допомогою твердого або газоподібного теплоносія. Для виробництва синтез-газу,

що використовується для отримання аміаку і метанолу, в оксосинтезі або в синтезі Фішера-Тропша необхідно точно підтримувати співвідношення $\text{CO}:\text{H}_2$ і $\text{H}_2:\text{N}_2$ у первинному газі. Усі ці вимоги зумовлюють керування ходом реакцій при газифікації. Це досягається не лише підбором тиску і температури; вирішальне значення має склад газифікуючого агента: він повинен складатися в основному з кисню і перегрітої водяної пари, можлива присутність CO_2 .

Якщо отримуваний газ спрямовують на синтез аміаку, то такий газ в ідеальному випадку повинен містити 75 % H_2 і 25 % N_2 ; вигідно застосовувати для газифікації вугілля повітря, збагачене киснем. При цьому передбачається, що газифікація палива проводиться безперервно.

Технологія плазмової газифікації вже сьогодні є технологією промислового використання, має комерційно успішні інсталяції по всьому світу (Японія, Індія, Англія, Китай, США). Ведуться роботи з проектування і будівництва в країнах Євросоюзу. Застосування плазмової газифікації невід'ємно пов'язано з Кіотською угодою зі зменшення впливу на атмосферу людини. Вплив на природу і людину нижче існуючих світових норм відповідних гранично можливих концентрацій в 10...15 разів.

Плазмова газифікація вугілля призначена для отримання екологічно чистого палива – синтез-газу, вільного від оксидів сірки і азоту, і є сукупністю таких основних гомогенних і гетерогенних реакцій:



Гідрування окислу вуглецю в процесі Фішера-Тропша є комплексом складних паралельних і послідовних реакцій, що включають утворення первинного адсорбованого комплексу, зростання вуглеводневого ланцюга і її обрив. Перебіг цих реакцій призводить до утворення кислот, ефірів і т. д. Шляхом каталітичного перероблення синтез-газу на металевих, оксидних, цеолітах і металокомплексних каталізаторах можна отримувати й інші найважливіші продукти нафтохімічного синтезу (олефіни, парафіни, спирти та ін.) [9]. Суть способу показано на рис. 1.

Система живлення 1 подає вугільний пил у плазмовий реактор 3, туди ж подається пара з парогенератора 2. Вугільний пил і пара надходять в зону дуги, що горить між стержневим електродом, який проходить через кришку реактора 5 і кільцевий електрод. Електромагнітна котушка 6 робить обертання дуги в горизонтальній площині. Під впливом високої температури у присутності окисника пара вугілля газифікується, в результаті чого утворюється синтез-газ, що складається переважно з оксиду вуглецю і водню. Негорюча частина вугілля у вигляді шлаку надходить вниз в камеру розділення 4, муфель 9 і далі – в шлакозбірник 13.

Синтез-газ, отриманий в першому ступені, спрямовується у верхню камеру розділення 4, куди із системи пилживлення 8 через горизонтальну частину 7 надходить вугільний пил і подається компресором 10 окислювальне агентповітря. При змішуванні аеросуміші, що складається з вугільного пилу і повітря із синтез-газом, останній займається. В результаті горіння синтез-газу в муфелі 9 виділяється теплота, необхідна для газифікації вугільного пилу. Процес розділення отриманого синтез-газу і шлаку відбувається в нижній камері розділення 11, звідки синтез-газ відсисається через горизонтальну частину 12 компресором 14. Шлак надходить в шлакозбірник 13.

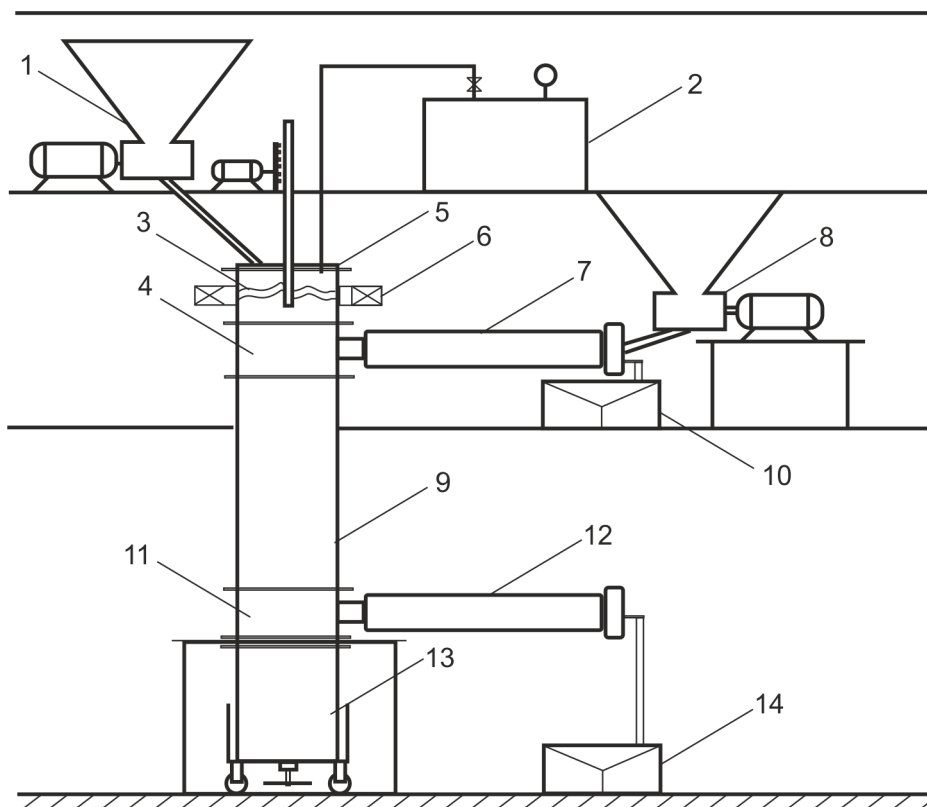


Рисунок 1 – Установа алло-автотермічної газифікації вугілля:

- 1, 8 – система паложивлення; 2 – парогенератор; 3 – плазмовий реактор; 4 – верхня камера розділення; 5 – кришка реактора; 6 – електромагнітна котушка;
7 – горизонтальна частина системи паложивлення; 9 – муфель; 10, 14 – компресор;
11 – нижня камера розділення; 12 – камера виведення газу; 13 – шлакозбірник;

Склад синтез-газу з плазмового реактора (за результатами експерименту з вугіллям [6]):

CO_2 – 1,1 %, O_2 – 0,8 %, CO – 40,2 %, H_2 – 46,7 %, Σ = 88,8 %, інші – 11,2 % – баласт (відсотки об'ємні). Співвідношення $\text{CO}:\text{H}_2 = 40,2:46,7 = 1:1,16$. Якщо працювати без коригування складу газу, то отриманий синтез-газ підходить для реакції над Fe – каталізатором, для якого потрібно співвідношення між фракціями $\text{CO}:\text{H}_2 = 1:1$. Кількість інертних домішок становить 13,1% (не повинно перевищувати 10...15 %); вихід синтез-газу з 1 т вугілля [6] і 700 кг пари становить 1,5 т, тобто 2300 м^3 . Із загального складу отриманого синтез-газу: C – $928,6 \text{ м}^3$ – $41,4 \cdot 10^3$ моль; H_2 – 1079 м^3 – $48,1 \cdot 10^3$ моль. Розрахунок синтетичного рідкого палива (СРП) йде за рівнянням хімічної реакції для Fe – каталізатора: $2\text{CO} + \text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{CO}_2$. Вихід вуглеводнів при цьому становить: $20,7 \cdot 10^3$ міль або 290 кг з 1 т вугілля. Практичний вихід усіх вуглеводнів не перевищує 90 % і становить 260 кг, для Fe – СРП – 62 %, тобто 161 кг з 1 т вугілля. За традиційними технологіями практичний вихід СРП знаходиться в межах 120...140 кг на 1 т вугілля.

Висновки. Високий вихід СРП при плазмовому способі пояснюється якіснішим

початковим продуктом (синтез-газом). Порівняно з традиційними технологіями газифікації вугілля плазмова технологія має такі переваги [6, 9]: висока питома продуктивність процесу; відсутність витрати твердого, рідкого і газоподібного палива; можливість швидкого нагрівання крупнозернистих частинок вугілля до високої температури в зоні газифікації за рахунок теплоти згоряння дрібної фракції; простота технічної реалізації процесу; можливість гнучкого варіювання технологічними параметрами в широкому діапазоні; компактність устаткування і малі питомі енерго- і металовитрати.

У випадку газифікації вугілля, і у випадку газифікації біомаси при застосуванні порівняно з переробленням ТПВ вимоги до систем газоочищення значно спрощуються. Незважаючи на це, включення такого обладнання у склад комплексів плазмової газифікації є обов'язковим. В цілому при підвищених вимогах до чистоти продуктів газифікації вартість обладнання для очищення газу може перевищувати вартість інших складових. У випадку газифікаторів малої продуктивності це може бути економічно неефективним. Тому, в цих випадках можливо застосування найпростіших засобів очищення газу у вигляді сепараторів циклонного типу для видалення із синтез-газу твердих частинок, а при подальшому його спаленні у газовому двигуні остаточне очищення вихідних газів може проводитися з використанням традиційних засобів очищення вихлопних газів двигунів внутрішнього згоряння.

Основним чинником, який затримує широке впровадження плазмових технологій у різні галузі промисловості, є недостатній рівень надійності та ресурсу плазмових генераторів. Окремою проблемою є інтеграція плазмових генераторів у технологічні ланцюги із забезпеченням сталої роботи усіх видів обладнання. Для розв'язання розглянутих вище проблем авторами запропоновано ряд технічних рішень для підвищення ефективності роботи установок газифікації сировини з інтегрованими електродуговими плазмогенераторами, які наведено в роботах [11–13].

Література

1. Вамболь В.В. Научные основы экологически безопасной утилизации твердых углеродсодержащих отходов: дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Кременчуг. нац. ун-т им. М. Остроградского. Кременчуг, 2016. 365 с.
2. Бутаков Е.Б. Исследование горения и газификации органических топлив с механо- и плазмохимической активацией применительно к энергетике и получению топливного газа: дис. ... канд. техн. наук: 01.04.14 / Ин-т теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Новосибирск. 2017. 154 с.
3. Власов О.А., Мечев В.В. Анализ работы печей сжигания отходов // Твердые бытовые отходы. 2017. № 8. С. 38–41.
4. Лавренов В.А. Экспериментальное исследование процесса двухстадийной термической конверсии древесной биомассы в синтез-газ: дис. ... канд. техн. наук : 05.14.01 / Объединенный ин-т высоких температур РАН. Москва, 2016. 152 с.
5. Ламинарный пограничный слой в потоке инертного газа в плазмотроне / С.И. Планковский, Е.В. Цегельник, Е.К. Островский, Д.А. Брега // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2010. Вып. 46. С. 69–74.

6. Буянтуев С.Л., Кондратенко А. С. К вопросу о возможности получения синтетического жидкого топлива из углей с помощью низкотемпературной плазмы // Вестник Бурятского государственного университета. 2009. № 3. С. 141–146.
7. Печуро Н.С. Химия и технология синтетического жидкого топлива и газа. М.: Химия, 1986. 460 с.
8. Альтшулер В.С. Новые процессы газификации твердого топлива. М.: Недра, 1976. 340 с.
9. Плазмохимическая переработка угля / М. Ф. Жуков, Р. А. Калинин, А. А. Левицкий, Л. С. Полак. М.: Наука, 1990. 200 с.
10. Вамболь В.В. Научные основы экологически безопасной утилизации твердых углесодержащих отходов: дис. ... д-ра техн. наук : 21.06.01 / Кременчуг. нац. ун-т им. М. Остроградского. Кременчуг, 2016. 365 с.
11. Алкиб А.М. Интеграция плазматенератора в состав установки газификации // Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н. Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2016. Вып. 4. С. 123–127.
12. Алкиб А.М., Брега Д.А., Ходак Р.А. Совершенствование методов расчета сепараторов циклонного типа, интегрированных в комплекс газификации сырья // Авиационно-космическая техника и технология. 2017. № 2. С. 26–31.
13. Планковский С.И., Брега Д.А., Цегельник Е.В., Алкиб А.М. Анализ методов плазменной переработки металлургических шлаков в электропечах постоянного тока // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. / Нац. аэрокосм. ун-т им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Харьков, 2016. Вып. 72. С. 68–76.

Bibliography (transliterated)

1. Vambol V.V. Nauchnyie osnovy ekologicheskii bezopasnoy utilizatsii tverdykh ughlesoderzhashchikh othodov: dis. ... d-ra tehn. nauk : 21.06.01 / Kremenichug. nats. un-t im. M. Ostrogradskogo. Kremenichug, 2016. 365 p.
2. Butakov E. B. Issledovanie goreniya i gazifikatsii organicheskikh topliv s mehano- i plazmohimicheskoy aktivatsiey primenitelno k energetike i polucheniyu toplivnogo gaza: dis. ... kand. tehn. nauk: 01.04.14 / In-t teplofiziki im. S. S. Kutateladze SO RAN. Novosibirsk. 2017. 154 p.
3. Vlasov O. A., Mechev V. V. Analiz raboty pechey szhiganiya othodov // Tverdyie byitovyye othodyi. 2017. # 8. P. 38–41.
4. Lavrenov V.A. Eksperimentalnoe issledovanie protsessa dvuhstadiynoy termicheskoy konversii drevesnoy biomassyi v sintez-gaz: dis. ... kand. tehn. nauk : 05.14.01 / Ob'edinennyiy in-t vyisokikh temperatur RAN. Moskva, 2016. 152 p.
5. Laminarnyyi pogranichnyiy sloi v potoke inertnogo gaza v plazmotrone / S.I. Plankovskiy, E.V. Tsegelnik, E.K. Ostrovskiy, D.A. Brega // Otkryityie informatsionnyie i kompyuternyye integrirovannyye tehnologii: sb. nauch. tr. / Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI». Harkov, 2010. Vyip. 46. P. 69–74.
6. Buyantuev S.L., Kondratenko A.S. K voprosu o vozmozhnosti polucheniya

sinteticheskogo zhidkogo topliva iz ugley s pomoschyu nizkotemperaturnoy plazmy // Vestnik Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. 2009. # 3. P. 141–146.

7. Pechuro N.S. Himiya i tehnologiya sinteticheskogo zhidkogo topliva i gaza. M.: Himiya, 1986. 460 p.

8. Altshuler V.S. Novyye protsessyi gazifikatsii tverdogo topliva. M.: Nedra, 1976. 340 p.

9. Plazmohimicheskaya pererabotka uglya / M. F. Zhukov, R. A. Kalinenko, A. A. Levitskiy, L. S. Polak. M.: Nauka, 1990. 200 p.

10. Vambol V.V. Nauchnyie osnovyi ekologicheskii bezopasnoy utilizatsii tverdykh uglesoderzhashchikh othodov: dis. ... d-ra tehn. nauk : 21.06.01 / Kremenchug. nats. un-t im. M. Ostrogradskogo. Kremenchug, 2016. 365 p.

11. Alkib A.M. Integratsiya plazmageneratora v sostav ustanovki gazifikatsii // Voprosy proektirovaniya i proizvodstva konstruktsiy letatelnykh apparatov : sb. nauch. tr. / Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI». Harkov, 2016. Vyip. 4. P. 123–127.

12. Alkib A.M., Brega D.A., Hodak R.A. Sovershenstvovanie metodov rascheta separatorov tsiklonnogo tipa, integrirovannykh v kompleks gazifikatsii syirya // Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tehnologiya. 2017. # 2. P. 26–31.

13. Plankovskiy S.I., Brega D.A., Tsegelnik E.V., Alkib A.M. Analiz metodov plazmennoy pererabotki metallurgicheskikh shlakov v elektropetchah postoyannogo toka // Otkryitiye informatsionnyie i kompyuternyye integrirovannyye tehnologii : sb. nauch. tr. / Nats. aerokosm. un-t im. N. E. Zhukovskogo «HAI». Harkov, 2016. Vyip. 72. P. 68–76.

УДК 519.63+621.9.048

Мохаммед Алтагер Албаршеши, директор інституту,
Алкіб Ахмед М. Мохаммед Алджалі, PhD, викладач кафедри оптики,
Нагла Фаєз Аллабаг, викладач кафедри фізики

Вищий інститут науки і техніки (Тріполі, Лівія)

СУЧАСНИЙ СТАН РОЗРОБОК В ГАЛУЗІ ПЛАЗМОВОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ТА ПЕРЕРОБЛЕННЯ ВІДХОДІВ

В роботі розглядається та підкреслюється актуальність і перспективність застосування плазмових технологій для перероблення відходів і газифікації сировини в сучасних умовах та необхідність вдосконалення методів проектування електродугових генераторів плазми, зокрема інтегрованих в установки газифікації сировини.

Ключові слова: електродуговий генератор плазми, переробка твердих побутових відходів, плазмова газифікація, синтез-газ.

УДК 519.63+621.9.048

Мохаммед Алтагер Албаршеши, Алкиб Ахмед М. Мохаммед Алджали,
Нагла Фаез Аллабаг

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ
ПЛАЗМЕННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ И ПЕРЕРАБОТКИ ОТХОДОВ**

Высший институт науки и техники (Триполи, Ливия)

В работе рассматривается и подчеркивается актуальность и перспективность применения плазменных технологий для переработки отходов и газификации сырья в современных условиях, а также необходимость совершенствования методов проектирования электродуговых генераторов плазмы, в частности интегрированных в установки газификации сырья.

Ключевые слова: электродуговой генератор плазмы, переработка твердых бытовых отходов, плазменная газификация, синтез-газ.

Mohammed Taher Isse Barshushi, Alkeeb Ahmed M. Mohammed Aljali,
Nahla Faiz Abdullah

**CURRENT STATE OF DEVELOPMENT IN THE FIELD
PLASMA GASIFICATION AND WASTE TREATMENT**

Higher Institute of Science and Technology (Tripoli, Libya)

The paper discusses and emphasizes the relevance and prospects of using plasma technologies for waste processing and gasification of raw materials in modern conditions, as well as the need to improve the design methods of electric arc plasma generators, in particular, integrated into the devices for gasification of raw materials.

Keywords: electric plasma generator, processing of solid household waste, plasma gasification, synthesis gas.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

- ✓ *энергетика и энергосбережение; энерготехнология энергоемких отраслей промышленности; нетрадиционная энергетика; ресурсосбережение; энергетика и окружающая среда;*
 - ✓ *теплоиспользующие установки; моделирование процессов промышленного оборудования; процессы и аппараты различных отраслей промышленности (химической, пищевой, мед. оборудования и проч.);*
 - ✓ *применение ЭВМ в технологических процессах; автоматизированные системы управления и обработки информации;*
 - ✓ *тепло- и массообменные процессы и оборудование специальной техники; тепловые процессы и криогенное оборудование медицинского назначения;*
 - ✓ *электроэнергетика; оборудование электростанций и передача электроэнергии;*
 - ✓ *экономические аспекты энергетики и промышленной экологии; коммерческий инжиниринг, реинжиниринг и технологический менеджмент,*
- а также другим направлениям, на стыке различных отраслей знаний.*

Материалы к опубликованию в каждый последующий номер принимаются до

20 числа последнего месяца предыдущего квартала.

Рукописи авторам не возвращаются.

Материал должен быть подготовлен на IBM-совместимом компьютере и распечатан в 2-х экземплярах. К материалам должна прилагаться электронная версия статьи, набранной в редакторе текстов MS Word for Windows версий 97, XP, 2000 или 2003.

К статье необходимо приложить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати и рецензию доктора наук по профилю подаваемой статьи.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:

Размер бумаги А4 (210x297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Суг; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:

- непосредственно под верхней границей слева **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается УДК статьи;
- пропустив одну строку, по центру печатаются инициалы и фамилии авторов с указанием регалий;
- пропустив одну строку, по центру полужирным шрифтом **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается название статьи;
- после размещаются ключевые слова;
- пропускается одна строка и с абзаца (1,25 см) печатается основной текст, отформатированный по ширине страницы;
- перед и после формул и уравнений должно быть расстояние в одну пустую строку до текста с интервалом 1;
- формулы и уравнения должны быть выровнены по центру;
- номера формул и уравнений выровнены по правому краю;
- размер шрифта формул и уравнений для основного текста – 12 пт.;
- рисунки, схемы и графики должны быть выполнены в черно-белом изображении;
- пропустив одну строку, следует список литературы, оформленный в соответствии с требованиями ДСТУ;
- дальше размещается транслитерация списка литературы;
- в конце статьи на украинском (русском – для статьи на украинском языке), русском и английском языках должны быть напечатаны УДК, авторы, название и аннотация.

Статьи, рекомендуемые к опубликованию членами редколлегии, не

проходять рецензування. Остальні статті рецензуються.

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГІИ

Украина, 61002,
Харьков-2, ул. Кирпичева, 2,
НТУ «ХПИ», редколлегия журнала
«Интегрированные технологии и
энергосбережение»,
технический редактор: к.техн.н., профессор
Горбунов К.А.

Тел. (057) 707-69-58.

Факс (057) 720-22-95.

Email: gor.kona2016@gmail.com

**СТАТЬИ, ОФОРМЛЕННЫЕ НЕ В СООТВЕТСТВИИ
С ПРАВИЛАМИ,
РЕДКОЛЛЕГИЕЙ НЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ**

**НА ЖУРНАЛ ОТКРЫТА ПОДПИСКА
В ПОЧТОВЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ УКРАИНЫ
ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС:**