

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.365.32:621.3.036.61-032.3(048.83)

ПАНОВ Є. М., д.т.н., професор; КАРВАЦЬКИЙ А. Я., д.т.н., професор, с.н.с.; ЛЕЛЕКА С. В., к.т.н.;
МІКУЛЬОНОК І. О., д.т.н., професор, с.н.с.; Іваненко О. І., к.т.н., доцент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СУЧАСНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ СКЛАДАННЯ КОЛОН ЗАГОТОВОК ЕЛЕКТРОДІВ ДЛЯ ЇХ ГРАФІТУВАННЯ В ПЕЧАХ ПРЯМОГО НАГРІВАННЯ

Проаналізовано особливості конструкцій, складу і властивості електроконтактних з'єднань між заготовками в колонах ядра печей Кастнера для графітування електродів. Показано, що від якості контакту між заготовками суттєво залежать експлуатаційні властивості одержуваної продукції. Тому розробка таких з'єднань разом з відповідними енергоефективними регламентами графітування електродних заготовок з електроконтактними прокладками певного типорозміру є актуальним і вкрай важливим завданням електродної галузі.

Ключові слова: вуглець, електрод, графітування, піч прямого нагрівання.

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2020.217899

© Панов Є. М., Карвацький А. Я., Лелека С. В., Мікульонко І. О., Іваненко О. І., 2020

Постановка проблеми. Одним з основних чинників, що впливають на якість електродної продукції, є електроконтактні з'єднання між заготовками в колонах ядра печей прямого нагрівання (печей Кастнера), в яких одержують високоякісні графітовані електроди для металургії. Відомо, що електроконтактні з'єднання між заготовками електродів істотно впливають на якість одержуваної електродної продукції [1–4]. Беручи до уваги, що натеper печі Кастнера є основним типом печей електродної промисловості у світі, то підвищення ефективності цих печей певною мірою можна віднести до вирішення проблеми як вітчизняного, так і світового рівня.

Одним зі шляхів підвищення ефективності печей Кастнера є розробка високоякісних електроконтактних з'єднань разом з відповідними енергоефективними регламентами графітування електродних заготовок, що є безумовно актуальним і вкрай важливим завданням електродної галузі.

Метою статті є аналіз конструктивно-технологічних методів (передусім електроконтактних прокладок) складання колон заготовок електродів для їх графітування в печах прямого нагрівання та їх впливу на якісні характеристики одержуваної електродної продукції.

Аналіз попередніх досліджень

Загальні питання процесу складання колон ядра печей прямого нагрівання

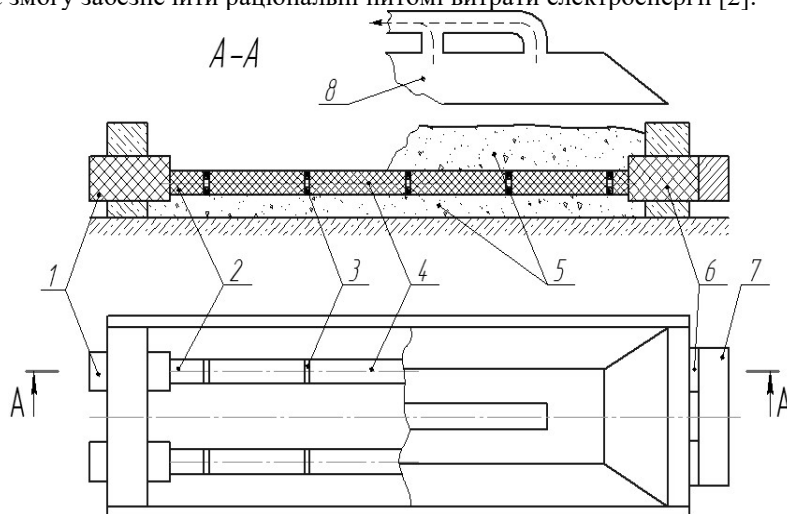
Технологічна операція – графітування вуглецевих матеріалів – є заключною стадією тривалого й багатопередільного процесу виготовлення всіх видів графітованих виробів, у тому числі й електродів. Графітуванню передусім піддають заготовки, що пройшли пресування й випал, у результаті яких заготовки набувають значну й нерівномірну пористість та анізотрію. Проте потрібні електропровідність і теплопровідність, а також низькі фрикційні властивості вироби набувають саме в процесі графітування.

Крім того, готові графітовані вироби мають задовольняти й інші експлуатаційні показники, зокрема міцність і деякі хімічні властивості, що формуються під час графітування.

Для процесу графітування електродні заготовки розміщують в печі певним чином, формуючи так званий «ядро» – розташовані між двома електродами печі заготовки вуглецевмісних електродів, що підлягають графітуванню, між якими для надійного електричного контакту розташовують електроконтактні прокладки (рис. 1).

Формування ядра є найважливішою ланкою технології графітування. Але одночасно це питання є

найбільш важким у його практичній реалізації, і далеко не всі його особливості вивчені достатньою мірою. Правильне формування ядра не тільки забезпечує найбільшу продуктивність і високу якість одержуваної продукції, але й дає змогу забезпечити раціональні питомі витрати електроенергії [2].



1 – рухомі струмопідводи; 2 – компенсаційні вставки; 3 – електроконтактні прокладки;
4 – електродні заготовки; 5 – теплоізоляційна шихта; 6 – нерухомі струмопідводи;
7 – електрична перемичка; 8 – засіб для відведення газів

Рис. 1 – Схема печі графітування Кастнера [2]

Аналіз сучасного розвитку світового виробництва графітованих електродів у печах Кастнера свідчить про те, що напрямки досліджень та розробок у цій галузі спрямовані передусім на підвищення енергоефективності печей прямого графітування, а також розробку високотехнологічних електроконтактних прокладок, що встановлюються між електродними заготовками тощо.

У праці [5] виконано дослідження можливості використання рекуперації теплоти теплоізоляції під час охолодження печей Кастнера та зроблено висновок про те, що такий спосіб дає змогу збільшити енергоефективність процесу графітування та підвищити продуктивність печей. Однак запропонований спосіб є складним та потребує значних капітальних вкладень для промислової реалізації та безпосередньо не впливає на регламент підводу електричної потужності у піч, інтенсифікація якого може бути більш дієвим чинником у підвищенні енергоефективності процесу графітування за мінімальних капітальних вкладень.

У праці [6] запропоновано вдосконалення непрямого способу підвищення енергоефективності процесу графітування електродних заготовок (тобто регламент введення електричної потужності у піч не змінюється), який полягає в застосуванні пластин з теплоелектроізоляційного вуглецевого матеріалу або вуглецевий пил (лампова сажа). Значним недоліком цього способу з використанням сажі як теплоізоляції ядра є висока вибухонебезпечність останньої, а застосування спеціальних пластин потребує додаткових капітальних затрат та має не значну енергоефективність.

У праці [7] наведено результати дослідження впливу контактного опору між електродними заготовками на температурне поле колони під час графітування. Показано, що неякісний теплоелектричний контакт між заготовками в колоні може призвести до їх деформування та ще більшого погіршення контакту між ними, але цьому має протистояти зусилля, з яким стискаються заготовки в колонах, та використання гнучких електроконтактних з'єднань між заготовками.

Праця [8] присвячена порівнянню електродів, отриманих за технологіями Кастнера та Ачесона. Показано, що електроди, отримані в печах Кастнера, характеризуються більшою термостійкістю порівняно з електродами, отриманими в печах Ачесона, але при цьому перші електроди мають меншу густину та механічну міцність, що пояснюється у статті більш високою швидкістю нагрівання електродів у печах Кастнера, що спричинює утворення в них мікротріщин. Проте утворення мікротріщин в електродах за технологією Кастнера може бути пов'язано з низкою інших чинників, до яких зокрема належить неоптимальний регламент графітування.

Авторами досліджень [9] була розроблена установка для вимірювання питомого електричного контактного опору контактних пар різних матеріалів залежно від тиску стиснення керна й температури. Отримані експериментальні дані з питомого електричного контактного опору мідь–графіт і графіт–терморозширений графіт–графіт залежно від тиску й температури, виконано порівняння результатів з відомими літературними даними. Проте в зазначеній праці не досліджено термомеханічний стан електроконтактних з'єднань між заготовками.

У праці [10] з використанням числової моделі теплоелектричного стану печі прямого графітування Кастнера, виконано числові дослідження впливу внутрішнього діаметра кільцевих електропрокладок і контактний електричний опору між електродними заготовками на фізичний стан печі. Для збільшення мінімальної температури заготовок впродовж процесу графітування вуглецевої продукції запропоновано використовувати на кінцях електродних свічок електроконтактні прокладки з підвищеним електричним опором. Встановлено, що раціональний діаметр отвору в електроконтактних прокладках повинен становити біля 50–70 % від зовнішнього діаметра заготовок. Проте в зазначеній праці зовсім не приділена увага способу фіксації електроконтактних прокладок між електродними заготовками. Також відсутні дані про раціональні регламенти графітування.

У праці [11] на підставі числового аналізу виконано дослідження впливу вологовмісту теплоізоляційної шихти на тепловий стан печі Кастнера у процесі графітування великогабаритних електродних заготовок. Встановлено, що суттєве збільшення вологості теплоізоляційного матеріалу печі за високих температур нагрівання може призвести до утворення тріщин у заготовках через інтенсивне виділення з них оксидів сірки.

Конструктивне оформлення колон керн печей прямого нагрівання

Дослідниками, проєктувальниками й винахідниками провідних промислових країн світу розроблено чимало конструкцій електроконтактних прокладок.

Однією з найбільш поширених в електродній промисловості є електроконтактна прокладка, виготовлена з вуглецевого матеріалу у вигляді диска (пат № US1029121A). Зазначена прокладка забезпечує надійний контакт між собою заготовок електродної колони або контакт крайніх заготовок електродної колони з електродами печі Кастнера, проте під час графітування заготовок електродної колони внаслідок нерівномірності їх прогріву вздовж радіуса відбувається викривлення їхніх плоских торців (з перетворенням плоских торців заготовок на опуклі), що погіршує електричний контакт між прокладками й заготовками, а також може призвести до механічного руйнування торців заготовок та/або прокладок [4].

Прокладку аналогічної форми наведено в пат. № US4086380A, GB1576337A, CA1077255A, AR221688A1 і ES463763A1, при цьому її виготовлено з частинок вуглецевмісного матеріалу (металургійний кокс, графітований нафтовий кокс, природний графіт, відходи графіту, а також їхні суміші), диспергованих в органічному зв'язуючому (латексна смола, пластифікований термопластичний полімер, гумова суміш). Незважаючи на високі механічні властивості зазначеної прокладки (гнучкість, пружність, добра оброблюваність) вона характеризується невисокою термостійкістю.

Для підвищення продуктивності печі згідно з пат. № US4916714A у ній розміщують декілька колон електродних заготовок.

У пат. № US5631919A, BR9605639A, CA2190680C, CN1164636A, JPН09184686A, KR970028409A, RU2129340C1, а також заявках № EP0775679B1, DE69611971T2, ES2156984T3, PL317091A1, TW346538B керн, що підлягає графітуванню, запропоновано розміщати не безпосередньо в печі, а в U-подібних металевих жолобах, розташованих у печі з проміжками між собою, стінками й дном печі для подальшого охолодження зграфітованих заготовок. Для інтенсифікації процесу охолодження може бути передбачено пристрій для розбризкування води на зовнішню поверхню зазначених жолобів. При цьому пересипка може завантажуватися не безпосередньо в піч, а в зазначені жолоби, що істотно знижує її витрату.

У печі згідно з пат. № US5299225A аналогічний жолоб виконаний гофрованим, що ще більше інтенсифікуює процес теплопередачі.

У печі відповідно до пат. № US4015068A, CA1058832A, DE2457923A, FR2293399B1, GB1470496A керн, що підлягає графітуванню, також запропоновано розміщати не безпосередньо в печі, але в оболонці з рухомими стінками. Зазначена конструкція не лише зменшує робочий об'єм печі, що знижує питомі витрати енергії, а й дає змогу відмовитися від пересипки.

У пат. № RU2343112C1 описано спосіб одержання електроконтактних прокладок зі спученого графіту шляхом пресування для подальшого їх використання для з'єднання електродних заготовок у колони керн

печей Кастнера. До недоліків цього способу можна віднести відсутність оптимальної густини прокладки, а також відомостей щодо методу фіксації прокладок між заготовками.

Крім електроконтактної прокладки у формі суцільного круглого диска постійної товщини авторами запропоновано диск у вигляді круглого кільця постійної товщини. Завдяки наявності отвору по центру диска механічні напруження, що виникають в місцях контакту торців заготовок з прокладками, порівняно з суцільним круглим диском зменшуються. Проте залишається ймовірність механічного руйнування торців заготовок та/або прокладок через значні механічні напруження в торцях заготовок та/або прокладок на радіусі, близькому радіусу отвору диска.

Згідно зі способом, описаним у заявці № WO01/78460A1, шаруваті електроконтактні прокладки виконано у вигляді багатошарових дисків, які по чергово набираються з шарів електропровідних матеріалів з низьким та високим електротермічним опором. До недоліків цього технічного рішення можна віднести незадовільну відтворюваність запропонованих електроконтактних прокладок, їх значний електричний опір, а також складність виготовлення прокладок, що виготовляється з декількох шарів графіту різної товщини та густини (як прокладки в цілому, так і окремих її шарів).

У пат. № RU2076085C1 описано спосіб одержання листів зі спученого графіту, які надалі можна використати для виготовлення електроконтактних прокладок.

Також для розроблення нових конструкцій електроконтактних прокладок можна скористатися підходами, закладеними в технічних рішеннях, що стосуються ущільнювальних прокладок фланцевих з'єднань [12].

Висновки. Аналіз досліджень сучасного стану проблеми складання колон заготовок електродів для їх графітування в печах прямого нагрівання дає підставу зробити такі висновки:

1) Вирішальним конструктивно-технологічним чинником процесу графітування заготовок електродів у печах прямого нагрівання є електроконтактні прокладки, які є складовим елементом колон заготовок електродів і розташовані між торцями сусідніх заготовок.

2) Процес графітування заготовок електродів у печах прямого нагрівання залежить від таких параметрів електроконтактних прокладок як матеріал прокладок, зокрема його структура, густина та питомий електричний опір, а також форма й розміри прокладок.

3) Основним напрямом вдосконалення електроконтактних прокладок є розроблення їхнього складу (якісного й кількісного), проте майже не досліджено можливість створення принципово нових конструктивних рішень, зокрема прокладок та їхніх елементів нових форми й розмірів на основі конструкційних матеріалів, що добре зарекомендували себе в умовах промислового виробництва.

Перспективи подальших досліджень. Надалі передбачено розробити спосіб виготовлення електроконтактних з'єднань та їх фіксації між електродними заготовками, які забезпечують високу рівномірність теплоелектричних полів у колонах керна, а також спосіб формування колон керна, які складаються з електродних заготовок та електроконтактних з'єднань між ними, за межами печей Кастнера, що дає змогу істотно скоротити термін простоїв печей між кампаніями. Також планується розробити інтенсифіковані енергоефективні регламенти введення електричної потужності в піч Кастнера, які забезпечують мінімізацію питомих витрат енергії процесу графітування.

Список використаної літератури

1. Чалых Е. Ф. Технология и оборудование электродных и электроугольных предприятий. Москва: Металлургия, 1972. 432 с.
2. Соседов В. П., Чалых Е. Ф. Графитация углеродистых материалов. Москва: Металлургия, 1987. 176 с.
3. Чалых Е. Ф. Оборудование электродных заводов. Москва: Металлургия, 1990. 238 с.
4. Теоретично-експериментальні дослідження печей графітування Кастнера. А. Ю. Педченко, Є. М. Панов, А. Я. Карвацький, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев. Київ: КПІ ім. І. Сікорського, 2017. 174 с.
5. Shen C., Zhang M., Li X. Numerical study on the heat recovery and cooling effect by built-in pipes in a graphitization furnace // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 90. P. 1021-1031. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.036>.
6. Vedin V., Pirogov V. Improving thermal insulation for graphitization furnaces // Refractories and Industrial Ceramics. 2008. Vol. 49. P. 416-417. <https://doi.org/10.1007/s11148-009-9115-x>.
7. Piekło J., Maj M. Analysis of the State of Stress in the Connection of Graphite Electrodes // Archives of Foundry Engineering. 2015. Vol. 15. P. 85-88.

8. Kuznetsov D., Korobov V. A Comparison of Properties of Electrodes Graphitized by the Acheson and Castner Methods // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2001. Vol. 42. P. 355-359. <https://doi.org/10.1023/A:1014022730724>.
9. Исследование электрического контактного сопротивления графита с медью и терморасширенным графитом / А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, И. В. Пулинец, Т. В. Лазарев, А. Ю. Педченко // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 5/5 (71). С. 45–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27989>.
10. Дослідження впливу конструктивно-технологічних параметрів на процес прямого графітування електродів у печах Кастнера / А. Я. Карвацкий, С. М. Панов А. Ю. Педченко, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев, В. В. Деркач, О. В. Тютюнник // *Вісник НТУ «ХПІ»; серія «Нові рішення в сучасних технологіях»*. 2017. № 32 (1254). С. 30-36. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.32.05>.
11. Вплив вмісту вологи в теплоізоляційному матеріалі на тепловий стан печі Кастнера / А. Я. Карвацкий, А. Ю. Педченко, С. В. Лелека, Т. В. Лазарев // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2018. № 1. С. 24–29.
12. Mikulionok I. O. Design of Flange Connections of Chemical Production Equipment (Review of Patents) // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2020. Vol. 56, No 1-2. P. 74-81. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00740-9>.

Надійшла до редакції 04.09.2020

Panov Ye. M., Karvatskii A. Ya., Leleka S. V., Mikulionok I. O., Ivanenko O. I.

THE CURRENT STATE OF THE PROBLEM OF ASSEMBLING ELECTRODE BLANKS COLUMNS FOR THEIR GRAPHITIZATION IN DIRECT HEATING FURNACES

One of the main factors influencing the quality of electrode products is the electrical contact connections between the blanks in the core columns of direct heating furnaces (Castner furnaces), which produce high-quality graphite electrodes for metallurgy. It is known that electrical contact connections between electrode blanks significantly affect the quality of the obtained electrode products. Given that Castner furnaces are now the main type of furnaces in the electrode industry in the world, the increase in the efficiency of these furnaces can to some extent be attributed to solving the problem of both domestic and global levels.

One of the ways to increase the efficiency of Castner furnaces is to develop high-quality electrical contacts together with the appropriate energy-efficient regulations for graphitization of electrode blanks, which is certainly an important and extremely important task of the electrode industry.

The aim of the article is the analysis of constructive-technological methods (first of all electrical contact gaskets) of assembling columns of electrode blanks for their graphitization in direct heating furnaces and their influence on the qualitative characteristics of the obtained electrode products.

As a result of the analysis of researches of a modern condition of a problem of assembly of columns of preparations of electrodes for their graphitization in furnaces of direct heating it is shown that:

– the decisive structural and technological factor of the process of graphitization of electrode blanks in direct heating furnaces are contact gaskets, which are a component of the columns of electrode blanks and are located between the ends of adjacent blanks;

– the process of graphitization of electrode blanks in direct heating furnaces depends on such parameters of electrical contact gaskets as gasket material, in particular its structure, density and electrical resistivity, as well as the shape and size of gaskets;

– the main direction of improvement of electrical contact gaskets is the development of their composition (qualitative and quantitative), but almost no study of the possibility of creating fundamentally new design solutions, including gaskets and their elements of new shapes and sizes based on structural materials that have proven themselves in industrial production.

In the future it is planned to develop a method of manufacturing electrical contact connections and their fixation between electrode blanks, which provide high uniformity of thermoelectric fields in core columns, as well as a method of forming core columns consisting of electrode blanks and electrical contact connections between them, outside Castner furnaces, which allows to significantly reduce the downtime of furnaces between campaigns. It is also

planned to develop intensified energy-efficient regulations for the introduction of electric power into the Castner furnace, which ensure the minimization of specific energy consumption of the graphitization process.

Keywords: carbon, electrode, graphitization, direct heating furnace.

References

1. Chalykh, Ye. F. (1972). *Tekhnologiya i oborudovaniye elektrodnykh i elektrougolnykh predpriyatiy* [Technology and equipment of the electrode and electrocoal enterprises]. Moscow : Metallurgiya, 432 p.
2. Sosedov, V. P., Chalykh, Ye. F. (1987). *Grafitatsiya uglerodistykh materialov* [Graphitization of carbon materials]. Moscow : Metallurgiya, 176 p
3. Chalykh, Ye. F. (1990). *Oborudovaniye Oborudovaniye elektrodnykh zavodov* [Equipment for electrode plants]. Moscow : Metallurgiya, 238 p.
4. Pedchenko, A. Yu., Panov, Ye. M., Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Lazarev, T. V. (2017). *Teoretychno-eksperymentalni doslidzhennia pechei grafituvannia Castnera* [Theoretical and experimental studies of Castner graphitization furnaces]. Kyiv, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 174 p.
5. Shen, C., Zhang, M., Li, X. (2015). Numerical study on the heat recovery and cooling effect by built-in pipes in a graphitization furnace, *Applied Thermal Engineering*, vol. 90, pp. 1021-1031. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.036>.
6. Vedin, V., Pirogov, V. (2008). Improving thermal insulation for graphitization furnaces, *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 49, pp. 416-417. <https://doi.org/10.1007/s11148-009-9115-x>.
7. Piekło, J., Maj, M. (2015). Analysis of the State of Stress in the Connection of Graphite Electrodes, *Archives of Foundry Engineering*, vol. 15, pp. 85-88.
8. Kuznetsov, D M., Korobov, V. K. (2001). A Comparison of Properties of Electrodes Graphitized by the Acheson and Castner Methods, *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 42, pp. 355-359. <https://doi.org/10.1023/A:1014022730724>.
9. Karvatskii, A. Ya., Leleka, S. V., Pulnirts, I. V., Lazarev, T. V., Pedchenko, A. Yu. (2014). Issledovaniye elektricheskogo kontaktnogo soprotivleniia grafita s mediu i termorasshirenym grafitom [Study of the electrical contact resistance of graphite with copper and thermally expanded graphite], *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii*, No 5/5 (71), pp. 45–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27989>.
10. Karvatskii, A. Ya., Panov, Ye. M., Pedchenko, A. Yu., Leleka, S. V., Lazarev, T. V., Derkach, V. V., Tiutiunnik, O. V. (2017). Doslidzhennia vplyvu konstruktyvno-tekhnologichnykh parametriv na protsess priamogo grafituvannia elektrodov u pechakh Castnera, *Visnyk NTU «KhPI»; seriiia «Novi rishennia v suchasnykh tekhnologiiakh»*, No 32 (1254). pp. 30-36. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2017.32.05>.
11. Karvatskii, A. Ya., Pedchenko, A. Yu., Leleka, S. V., Lazarev, T. V. (2018). Vplyv vmistu vology v teplozoliatsiinomu materialu na teplovyi stan pechi Castnera [Influence of moisture content in heat-insulating material on the thermal state of Castner furnace], *Visnyk Vinnytskogo politechnichnogo instytutu*, No 1, pp. 24–29.
12. Mikulionok, I. O. (2020). Design of Flange Connections of Chemical Production Equipment (Review of Patents), *Chemical and Petroleum Engineering*, vol. 56, No 1-2, pp. 74-81. <https://doi.org/10.1007/s10556-020-00740-9>.

УДК 681.5

**КЛУСТА Т. В., магістр, ЛАДІЄВА Л. Р., к.т.н., доцент, ДУБІК Р. М., к.т.н.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

СИНТЕЗ РОБАСТНОГО РЕГУЛЯТОРА В ПРОЦЕСІ АЛКІЛУВАННЯ БЕНЗОЛУ ПРОПІЛЕНОМ У РІДКІЙ ФАЗІ

Процес алкілування є доповненням процесу каталітичного крекінгу. Саме ці процеси є одними з найважливіших у виготовленні нафтопродуктів. Тому доцільне питання підвищення ефективності виробництва та розробки системи керування для процесу алкілування бензолу пропіленом у рідкій фазі.