

Москалик В. М., Карпюк Л. В., Табунщиків В. Г., Созонтов В. Г.

ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МЕХАНІЧНОГО ПЕРЕМІШУВАННЯ РІДКИХ СЕРЕДОВИЩ СТОСОВНО ДО РЕАКТОРА ОДЕРЖАННЯ КАРБАМІДФОРМАЛЬДЕГІДНОЇ СМОЛИ

Широке використання карбамідформальдегідної смоли (КФС) як складової у виробництвах деревообробної промисловості обумовлено відносно простою технологією її виробництва та порівняно дешевими вихідними матеріалами. КФС одержують за способом поліконденсації, виникаючим при взаємодії карбаміду з формальдегідом. Основним апаратом у виробництві КФС є реактор – апарат з мішалкою, в якому реалізується процес перемішування в рідкому середовищі. Саме на реактор припадає основне навантаження зі споживанням електроенергії, що витрачається при перемішуванні. В процесі виробництва реактор на різних операціях виконує перемішування рідких серед, які змінюються за складом та температурою і відповідно змінюються в часі густина та в'язкість рідкої серед, що впливає на потужність, яку споживає перемішувачий пристрій. Встановлено, що загальна корисна потужність, що витрачається реактором при перемішуванні для одержання КФС, залежить від загальної кількості операцій, часу окремих операцій та корисної потужності, що витрачається, на кожній операції. Представлена загальна концепція моделювання процесу механічного перемішування рідких середовищ стосовно до реактора одержання КФС. Проведені ґрунтовні дослідження процесу механічного перемішування на лабораторній експериментальній установці з вірогідним задіянням результатів дослідження при моделюванні процесу в реакторі для одержання КФС. Розроблена методика обробки експериментальних даних процесу механічного перемішування на прикладі лабораторної експериментальної установки. Отримана емпірична формула розрахунку критерію потужності на перемішування в залежності від модифікованого критерія Рейнольдса, яка дозволяє у діапазоні проведеного експерименту прогнозувати потужність, що витрачається на перемішування. Результати досліджень можуть бути задіяні в промисловій практиці при прогнозуванні споживання електроенергії реактором або проектуванні самого реактора у виробництві КФС.

Ключові слова: карбамідформальдегідна смола, реактор, мішалка, корисна потужність, перемішування, фізичне моделювання.

Вступ. Карбамідформальдегідні смоли (КФС) одержують в реакторі за способом поліконденсації, виникаючим при взаємодії карбаміду з формальдегідом. Відповідно до даного способу реакції поліконденсації відбуваються в декілька стадій, а напрямок та властивість продуктів, що утворюються, залежать від співвідношення вихідних речовин, концентрації іонів водню (рН) у реакційній суміші, температури та тривалості самого процесу. Вважається, що механізм утворення КФС при конденсації карбаміду с формальдегідом дуже складним та недостатньо вивченим [1].

Основним апаратом у виробництві КФС є реактор – апарат з мішалкою, в якому реалізується процес перемішування в рідкому середовищі. Саме на реактор припадає основне навантаження зі споживанням електроенергії, що витрачається при перемішуванні. В процесі виробництва реактор на різних операціях виконує перемішування рідких серед, які змінюються за складом та температурою і відповідно змінюються в часі густина та в'язкість рідкої серед, що впливає на потужність, яку споживає перемішувачий пристрій [2]. Тому спроможність завбачення потужності, що споживає реактор, є актуальною задачею.

Опис виробництва одержання карбамідформальдегідної смоли. Виробництво смоли марки КФС включає наступні основні стадії: приготування конденсаційного розчину карбаміду у формаліні; конденсація в середовищі із змінним рН; вакуум-концентрація водного розчину смоли; охолодження та вивантаження смоли.

Технологічний процес отримання КФС здійснюється в сталевому реакторі з сорочкою для підігріву і охолодження і мішалкою для перемішування суміші. Реактор забезпечений холодильником. У реактор із збірки через дозуючий лічильник завантажується розрахункова кількість формаліну не більш 25527 кг. При працюючій мішалці і температурі (20–30) °С в реактор через воронку завантажується розчин їдкого натру для доведення рН середовища до значення 6,5–7,5. Після досягнення рН середовища 6,5–7,5 за допомогою вакууму проводиться завантаження карбаміду в кількості не більш 3700 кг. Масове співвідношення між карбамідом і формаліном 1:(6–7). Розчинення карбаміду у формаліні проводиться при температурі (20–30) °С протягом (20–30) хвилин при безперервному перемішуванні.

Після закінчення розчинення карбаміду в реактор через воронку завантажується розчин їдкого натру для доведення рН середовища до значення 6,5–7,5. Далі проводиться нагрів конденсаційного розчину до температури (90–

95) °C подачею пари в сорочку реактора. При температурі (90–95)°C і з початково заданим рН, рівним 6,5–7,5, проводиться витримка не більше 5 годин. Під час витримки відбувається мимовільне зниження рН середовища до значення 4,5–4,9 після чого витримка припиняється і реакційна маса в реакторі охолоджується до температури (60–65) °C подачею в сорочку апарату охолодженої води.

Одночасно з охолодженням реакційної маси через воронку в реактор завантажується розчин їдкого натру і встановлюється рН водного розчину КФС в межах 6,5–7,5. Далі проводиться вакуум-концентрація (сушка) водного розчину КФС. З метою виключення піноутворення при кипінні водного розчину КФС в реактор завантажується до 1л піногасника.

Перед вакуум-концентрацією проводиться підключення реактора через холодильник до системи вакууму. При розрідженні не менше 0,06МПа (0,6 кгс/см²) і температурі (65–80) °C проводиться вакуум-концентрація (сушка) водного розчину КФС. У процесі вакуум-концентрації смоли (КФС) пари метанолу, формальдегіду і води поступають в холодильник, де конденсуються і через барометричний бачок конденсат зливається в збірку, звідки зливається у нейтралізатор і далі на станцію перекачування. Досягши вологи в розчині КФС близько 20 %, вакуум-концентрація припиняється.

Після закінчення вакуум-концентрації смола охолоджується до температури (25–40) °C подачею в сорочку реактора заохолодженої води. Через воронку в реактор завантажується розчин їдкого натру і рН смоли доводиться до 6,5–7,5. З реактора смола через сочевицеподібний фільтр азотом видається в залізничну цистерну [3].

Постановка задачі дослідження. З опису виробництва КФС виходить, що на всіх операціях одержання продукції в реакторі витрачається енергія на перемішування рідкої середовища, а саме загальна корисна потужність $N_{\text{заг}}$, яка складається з корисних потужностей окремих операцій при перемішуванні:

$$N_{\text{заг}} = \sum_{i=1}^n \tau_i N_i, \quad (1)$$

де τ_i – час окремої операції; N_i – корисна потужність, що витрачається на перемішування в окремій операції; n – загальна кількість операцій, i – номер окремої операції ($i=1, 2, 3, \dots, n$).

Корисна потужність окремої операції N_i визначається згідно [4, 5, 6] рівнянням:

$$N_i = K_{N_i} \rho_{c_i} n_i^3 D_M^5, \quad (2)$$

де K_{N_i} – критерій потужності, що витрачається на даній операції; ρ_{c_i} – густина рідкої середовища в реакторі на даній операції; n_i – частота обертання мішалки на даній операції; D_M – діаметр мішалки.

Величина N_i необхідна для одержання вірогідних результатів для прийняття правильного рішення при проектуванні або прогнозуванні. Для цього пропонується проведення натурного моделювання процесу перемішування в лабораторних умовах з використанням особливостей реального реактора з подальшим перенесенням властивостей процесів перемішування з моделі на об'єкт на основі теорії подібності.

Для визначення густини рідкої середовища ρ_{c_i} достатньо використання модельної середовища з фіксованою температурою, а саме водної суспензії, густину якої можна розраховувати за рівнянням:

$$\frac{1}{\rho_{c_i}} = \frac{\bar{x}}{\rho_{\text{ТВ}}} + \frac{1-\bar{x}}{\rho_{\text{р}}}, \quad (3)$$

де $\rho_{\text{ТВ}}$ – густина твердих частинок крейди; $\rho_{\text{р}}$ – густина води; \bar{x} – масова частка крейди у суспензії.

Щодо типу та діаметру мішалки, то пропонується обирати той же тип мішалки, а діаметр лабораторної мішалки d_m зменшити на величину k від діаметра промислової D_M , рівну:

$$k = \frac{D_M}{d_m}, \quad (4)$$

при цьому необхідно обов'язково забезпечити постійними: співвідношення діаметра апарата до діаметра мішалки, співвідношення ширини лопаті мішалки до діаметра апарата, а також число лопатей, кут нахилу лопаті до горизонту та число і ширину встановлених перегородок.

Частота обертання n_i мішалки остається незмінним.

Критерій потужності K_{N_i} , що витрачається на даній операції, для подальшого використання отриманих експериментальних даних по перемішуванню, рекомендують розраховувати за формулою:

$$K_{N_i} = C \text{Re}_{m_i}^m, \quad (5)$$

до якої входять постійні коефіцієнти C і m . Логарифм цієї формули дає зручну для використання в розрахунковій практиці лінійну залежність [7]:

$$\lg K_{N_i} = \lg C + m \lg \text{Re}_{m_i}, \quad (6)$$

де Re_{m1} – відома з практики величина модифікованого критерію Рейнольдса на даній операції.

Для перевірки вказаного припущення з подальшим застосування фізичного моделювання процесів перемішування на практиці стосовно до виробництва одержання КФС проведено докладні дослідження процесу перемішування на лабораторній експериментальній установці.

Опис лабораторної експериментальної установки та методики експерименту. Експериментальний стенд (рис. 1), що включав мішалку типу ЛМ, яка складалася з пластмасової основи 1, де вертикально розміщено електродвигун 2, та ємності 3, в якій встановлено механічну мішалку 4. Вісь електродвигуна 2 співвісна з віссю механічної мішалки 4. За допомогою автотрансформатора 5, з яким з'єднана електрика електродвигуна 2, можлива плавна зміна числа обертів мішалки 4. Замір числа обертів здійснювався електронним тахометром 6. Визначення потужності, що споживалася на механічне перемішування, розраховувалася за показаннями вольтметра 7 та амперметра 8. Температура рідини фіксувалася термометром 9. Вивченню підпадала мішалка рамного типу з відбивальними перегородками, високу ефективність використання яких підтверджено авторами в роботі [8].

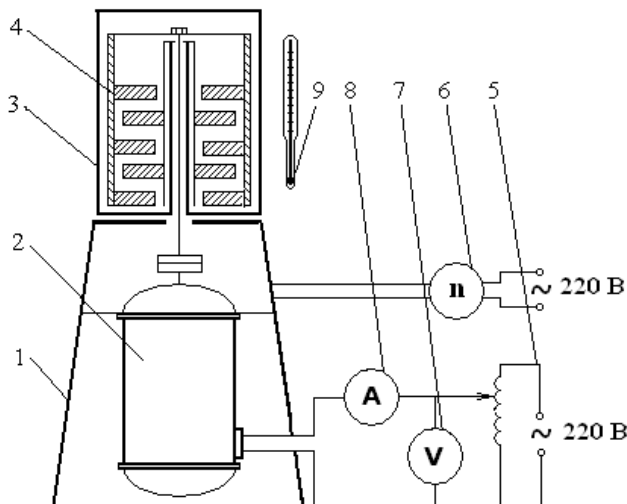


Рисунок 1 - Схема лабораторної експериментальної установки:

1 – пластмасова основа; 2 – електродвигун; 3 – ємність; 4 – механічна мішалка; 5 – автотрансформатор;
6 – електронний тахометр; 7 – вольтметр; 8 – амперметр; 9 – термометр

Загальний вид лабораторної експериментальної установки наведено на рис. 2.

На першому етапі роботи необхідно було приготувати водну суспензію потрібної концентрації та залити в ємність. За модельну систему для вивчення механічного перемішування вибрали водну суспензію крейди. Використовували крейду, що має не менш за 98 % $CaCO_3$, попередньо подрібнену за допомогою товкача у ступці до середнього розміру частинок за даними мікроскопа 1,5 – 2,5 мкм. $CaCO_3$ має низьку розчинність, не утворює кристалогідратів і хімічно не взаємодіє з водою. Крейда мала питому поверхню 2000 m^2/kg і густину $\rho_r=2200$ kg/m^3 . Водяну суспензію приготували при температурі води 20 $^{\circ}C$ із додаванням крейди у кількості 20 % мас. ($\bar{x} = 0,2$). В результаті загальний об'єм водної суспензії доводили до об'єму 3 літрів, який потім заливався для перемішування в ємність діаметром $D=160$ мм, що в результаті встановлювало в ній рівень $H=150$ мм.

Розрахункова густина водної суспензії крейди склала $\rho_p=1120,43$ kg/m^3 .

Динамічний коефіцієнт в'язкості μ_c водної суспензії, що залежить від концентрації твердих частинок, було розраховано з рівняння:

$$\mu_c = \mu_p (1 + 2,5\varphi), \quad (7)$$

де φ – об'ємна частки твердих частинок в суспензії, що розрахована з рівняння:

$$\varphi = \frac{\bar{x}}{\frac{\rho_{гв}}{\rho_p}(1-\bar{x})} = 0,1020. \quad (8)$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості μ_c водної суспензії остаточно склав $\mu_c=1,255 \cdot 10^{-6}$ Па·с.



Рисунок 2 - Загальний вид лабораторної експериментальної установки:
1 – вольтметр; 2 – амперметр; 3 – ємність с мішалкою

Досліджували мішалку рамного типу, діаметр якої складав $d_m=150$ мм. За конструкцією рамна мішалка мала в наявності за горизонталлю дві взаємно перпендикулярні лопаті, що встановлені за висотою в три ряди, з шириною кожної лопаті 10 мм. Ємність мала відбивні перегородки.

Методика постановки експерименту полягала в наступному. Перед початком проведення експерименту ручку автотрансформатора встановлювали на нуль. Далі вмикали експериментальний стенд в мережу. Плавню обертаючи ручку автотрансформатора, встановлювали напругу за вольтметром 50 В. Після досягнення сталого режиму роботи мішалки записували показання: вольтметра (U, В), амперметра (I, А) та електронного тахометра (n, об/хв). Повторювали аналогічні дії в діапазоні показання вольтметра 60 В, 70 В, 80 В, 90 В. Тричі повторювали експеримент та вносили показання приладів. Закінчив проведення експерименту, плавно обертали ручку автотрансформатора на нуль. Вимикали експериментальний стенд з мережі. Температуру водної суспензії т вимірюють до експерименту та після при вимкненій мішалці.

Слід відзначити, що при числі обертів більших ніж 130 об/хв в ємності для перемішування утворювалася воронка, що вказує на вірогідність зниження інтенсивності і ефективності перемішування.

Знаючи діаметр мішалки d_m , розраховувався модифікований критерій Рейнольдса. Далі за експериментальними даними U та I визначалася потужність мішалки, що споживалася на механічне перемішування:

$$N = UI \cos \alpha \eta_{дв}, \quad (9)$$

де U – напруга, В; I – сила струму, А; $\cos \alpha$ – коефіцієнт потужності; $\eta_{дв}$ – ККД електродвигуна. В розрахунках приймали $\eta_{дв}=0,8$ та $\cos \alpha=0,85$. Експериментальний критерій потужності K_N розраховували за рівнянням:

$$K_N = \frac{N}{\rho n^3 d_m^5} \quad (10)$$

Результати та їх обговорення. Основний параметр, який необхідно знати при перемішуванні, це потужність, яку споживає перемішувач, що залежить від багатьох факторів. Тому метою даних експериментальних досліджень стало вивчення процесу перемішування, а саме, виявлення впливу геометричних і технологічних параметрів на потужність, що споживається мішалкою, а також установлення математичної залежності критерію потужності від модифікованого числа Рейнольдса.

Отримавши результати досліджень, за допомогою програми для роботи з електронними таблицями Microsoft Excel одержана графічна залежність $\lg Re_m - \lg K_N$ у вигляді прямої лінії, для якої коефіцієнт сили кореляції $R^2=0,9918$. Отримувана залежність має вигляд:

$$\lg K_N = 16,676 - 1,86691 \cdot \lg Re_m,$$

із якої зіставленням неважко отримати значення коефіцієнтів $C=4,7424 \cdot 10^{16}$ і $m=-1,86691$. Остаточна шукана формула має вигляд:

$$K_N = 4,7424 \cdot 10^{16} \cdot Re_m^{-1,86691},$$

що є оригінальною для даних умов.

Графічна залежність логарифма критерія потужності мішалки $\lg K_N$ від логарифма модифікованого критерія Рейнольдса $\lg Re_M$ представлена на рис. 3.

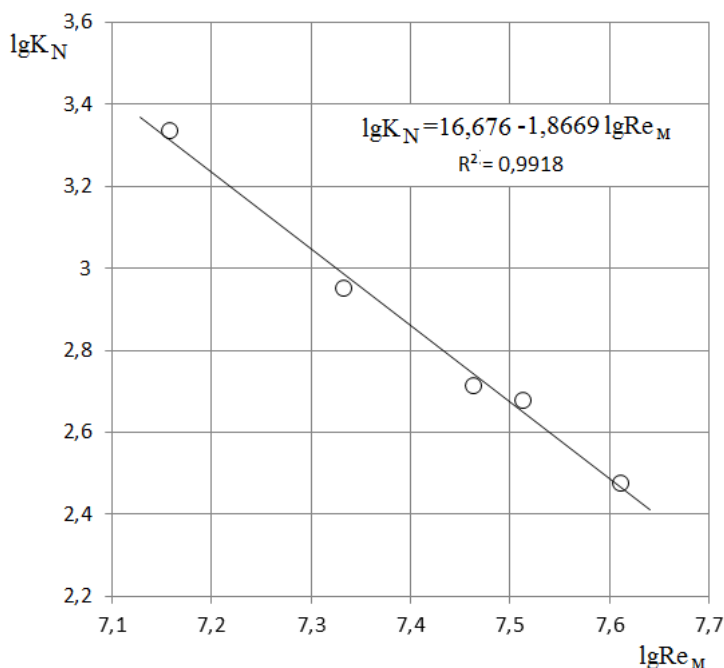


Рисунок 3 - Графік залежності логарифма критерія потужності мішалки $\lg K_N$ від логарифма модифікованого критерія Рейнольдса $\lg Re_M$

Висновки. За результатами проведеної роботи щодо фізичного моделювання процесу механічного перемішування рідких середовищ стосовно до реактора одержання КФС можна зробити наступні висновки:

1. Реактор для одержання КФС є основним споживачем електроенергії, що витрачається при перемішуванні на різних операціях виробництва.

2. Загальна корисна потужність, що витрачається реактором при перемішуванні для одержання КФС, залежить від загальної кількості операцій, часу окремих операцій та корисної потужності, що витрачається, на кожній операції.

3. Представлена загальна концепція моделювання процесу механічного перемішування рідких середовищ стосовно до реактора одержання КФС.

4. Проведені ґрунтовні дослідження процесу механічного перемішування на лабораторній експериментальній установці з вірогідним задіянням результатів дослідження при моделюванні процесу в реакторі для одержання КФС.

5. Розроблена методика обробки експериментальних даних процесу механічного перемішування на прикладі лабораторної експериментальної установки.

6. Отримана емпірична формула розрахунку критерію потужності на перемішування в залежності від модифікованого критерія Рейнольдса, яка дозволяє у діапазоні проведеного експерименту прогнозувати потужність, що витрачається на перемішування.

7. Результати досліджень можуть бути задіяні в промисловій практиці при прогнозуванні споживання електроенергії реактором або проектуванні самого реактора у виробництві карбамід формальдегідних смол.

Література

1. Доронин Ю. Г., Мирошніченко С. Н., Свиткина М. М. Синтетические смолы в деревообработке. – М.: Лесн. пром-сть, 1987. – 224 с.
2. Москалик В. М., Гордєев М. В. Вибір перемішуючого пристрою для основного апарата виробництва карбамідформальдегідних смол // Тези докл. XI всеукраїнської конф. «Майбутній науковець – 2020». – Северодонецьк. – 2020. – С. 173-175.
3. Технологічний регламент виробництва карбамідформальдегідних смол продуктивністю 30 тисяч тонн на рік. Технологічна частина. – Северодонецьк, 2010. – 250 с.
4. Стренк Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками. – Л.: Химия, 1975. – 384 с.
5. Брагинский Л. Н., Бегачев В. И., Барабаш В. Н. Перемешивание в жидких средах: Физические основы и инженерные методы расчета. – Л.: Химия, 1984. – 336 с.
6. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. – Л.: Химия, 1963. – 416 с.

7. Батурин Л. М., Позин М. Е. Математические методы в химической технике. – Л. : Химия, 1968. – 824 с.
8. Луныка К., Вус Д., Чумаков Г. Дослідження масопередачі при перемішуванні турбінною мішалкою в посудинах з відбивними перегородками // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2008. – Т. 13. – № 1. – С. 171-176.

References

1. Doronin Yu. G., Miroshnichenko S. N., Svitkina M. M. Sinteticheskie smolyi v derevoobrabotke. Lesnaya promyshlennost, Moscow, 1987. 224 p.
2. Moskalyk V. M., Gordeev M. V. Vibir peremishuyuchogo pristroyu dlya osnovnogo aparata virobnitstva karbamidformaldegidnih smol. XI Conference «Maybutniy naukovets-2020». Ukraine, Severodonetsk, 2020. pp. 173-175.
3. Technological regulations for the production of urea-formaldehyde resins with a capacity of 30 thousand tons per year. Technological part. Severodonetsk, 2010. 250 p.
4. Strenk F. Peremeshivanie i apparaty s meshalkami. Khimiya, Leningrad, 1975. 384 p.
5. Braginskiy L. N., Begachev V. I., Barabash V. N. Peremeshivanie v zhidkih sredah: Fizicheskie osnovy i inzhenernyie metodyi rascheta. Khimiya, Leningrad, 1984. 336 p.
6. Shterbachek Z., Tausk P. Peremeshivanie v himicheskoy promyshlennosti. Khimiya, Leningrad, 1963. 416 p.
7. Baturin L.M., Pozin M.E. Matematicheskie metodyi v himicheskoy tehnikе. Khimiya, Leningrad, 1968. 824 p.
8. Lunyaka K., Vus D., Chumakov G. Doslidzhennya masoperedachi pri peremishuvanni turbInnoyu mishalkoyu v posudinah z vidbivnimi peregorodkami. Scientific journal of the Ternopil National Technical University, 2008, vol. 13, no 1, pp. 171-176.

Широкое использование карбамидформальдегидной смолы (КФС) как составляющей в производствах деревообрабатывающей промышленности обусловлено относительно простой технологией ее производства и сравнительно дешевыми исходными материалами. КФС получают по способу поликонденсации, возникающим при взаимодействии карбамида с формальдегидом. Основным аппаратом в производстве КФС является реактор - аппарат с мешалкой, в котором реализуется процесс перемешивания в жидкой среде. Именно на реактор приходится основная нагрузка с потреблением электроэнергии, расходуемой при перемешивании. В процессе производства реактор на различных операциях выполняет перемешивание жидких сред, которые изменяются по составу и температуре и соответственно изменяются во времени плотность и вязкость жидкой среды, влияющие на мощность, которую потребляет перемешивающее устройство. Установлено, что общая полезная мощность, затрачиваемая реактором при перемешивании для получения КФС, зависит от общего количества операций, времени отдельных операций и полезной мощности, расходуемой на каждой операции. Представлена общая концепция моделирования процесса механического перемешивания жидких сред применительно к реактору получения КФС. Проведены фундаментальные исследования процесса механического перемешивания на лабораторной экспериментальной установке с вероятным задействованием результатов исследования при моделировании процесса в реакторе для получения КФС. Разработана методика обработки экспериментальных данных процесса механического перемешивания на примере лабораторной экспериментальной установки. Получена эмпирическая формула расчета критерия мощности на перемешивание в зависимости от модифицированного критерия Рейнольдса, которая позволяет в диапазоне проведенного эксперимента прогнозировать мощность, затрачиваемую на перемешивание. Результаты исследований могут быть задействованы в промышленной практике при прогнозировании потребления электроэнергии реактором или проектировании самого реактора в производстве КФС.

Ключевые слова: карбамидформальдегидная смола, реактор, мешалка, полезная мощность, перемешивание, физическое моделирование.

The widespread use of carbamideformaldehyde resin as a component in the woodworking industry is due to the relatively simple technology of its production and relatively cheap raw materials. Urea-formaldehyde resins are produced by the polycondensation method in interaction of carbamide with formaldehyde. The main apparatus in the production of carbamideformaldehyde resins is a reactor - an apparatus with a stirrer, in which the process of mixing in a liquid medium is realized. It is the reactor that has the main load with the consumption of electricity consumed during stirring. In the production process, the reactor, in various operations, performs mixing of liquid media, which change in composition and temperature and, accordingly, the density and viscosity of the liquid medium change over time, affecting the power consumed by the mixing device. It has been found that the total useful power consumed by the reactor during stirring to obtain carbamideformaldehyde resins depends on the total number of operations, the time of individual operations and the useful power consumed in each operation. The general concept of modeling the mechanical mixing process of liquid media in application to the reactor for the production of carbamideformaldehyde resins is presented. Fundamental research has been carried out on the process of mechanical stirring in a laboratory experimental setup with the probable use of the research results in modeling the process in a reactor to obtain carbamideformaldehyde resins. A technique for processing experimental data of the mechanical mixing process is developed using the example of a laboratory experimental setup. An empirical formula has been obtained for calculating the mixing power criterion depending on the modified Reynolds criterion, which makes it possible to predict the power spent for mixing in the range

of the experiment performed. The research results can be used in industrial practice when predicting the power consumption of a reactor or designing the reactor itself in the production of carbamiformaldehyde resins.

Key words: *carbamiformaldehyde resin, reactor, stirrer, net power, stirring, physical modeling.*

Москалик В. М., к.т.н., доцент кафедри машинобудування та прикладної механіки СНУ імені В. Даля, e-mail: moskalyk2017@gmail.com

Карпюк Л. В., старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки СНУ імені В. Даля, e-mail: karp224@gmail.com

Табунціков В. Г., старший викладач кафедри машинобудування та прикладної механіки СНУ імені В. Даля, e-mail: tabvladimir1954@gmail.com

Созонтов В. Г., д.т.н., професор кафедри машинобудування та прикладної механіки СНУ імені В. Даля, e-mail: vgsozontov@ukr.net