

ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 621.542.622.012.2

Поліпшення показників грануляційної вежі карбамідного виробництваГ. К. Лавренченко^{1✉}, Б. Г. Грудка^{2✉}¹ТОВ «Інститут низькотемпературних енерготехнологій», а/с 188, Одеса, 65026, Україна²Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, Одеса, 65082, Україна✉ e-mail: ¹lavrenchenko.g.k@gmail.com; ²bogdangennadievich@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-8239-7587>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>

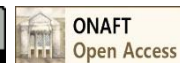
Інтенсифікація великотоннажних виробництв карбаміду є актуальною задачею. Один з факторів, що стримують збільшення виробництва карбаміду – недостатня продуктивність грануляційної вежі, в якій знизу подається зовнішнє повітря для охолодження вільно падаючих крапель плаву карбаміду. Розглянуто три способи підготовки повітря, що подається в нижню частину грануляційної вежі. Показано, що перші два способи не можуть істотно підвищити продуктивність вежі. Великі можливості має третій спосіб, при реалізації якого охолодження повітря організовується в порожнистому форсуночному водяному скруббері. При такому підході можна також значно знизити габарити теплообмінника-випарника, так як його вдасться встановити на потоці циркулюючої в скруббері води, а не на потоці повітря. Виконано розрахунки трьох варіантів подачі повітря в грануляційну вежу, які відрізняються один від одного умовами всмоктування повітря перед напірним осьовим вентилятором К-664А (або К-664В). Перший варіант відповідає літнім умовам роботи вежі, коли температура зовнішнього повітря 35 °С. Другий варіант відповідає нормальним умовам роботи при температурі повітря 20 °С. При використанні третього варіанту брали, що температура повітря, яке оброблюється в скруббері, знижується від 35 до 7 °С. Розрахунки проводилися з урахуванням не тільки змінних температури і відносної вологості зовнішнього повітря, але також і підведення до повітря, яке оброблюється в скруббері, тепла, еквівалентного потужності напірного вентилятора. Приймались до уваги умови теплообміну повітря, що підігрівається, і карбаміду, що охолоджується, в апараті киплячого шару. Виконані розрахунки дозволяють для повітря, яке охолоджується, використовувати агрегатну машину WOC-100 виробництва компанії «McQuay» (США) з двома відцентровими компресорами, що працюють на R134a. При роботі грануляційної вежі за другим варіантом, коли в жарку пору (травень-жовтень) в неї подається повітря, що охолоджується в скруббері до 20 °С, можна зробити додатково приблизно 40000 т гранульованого карбаміду.

Ключові слова: Карбамід; Гранулювання; Грануляційна вежа; Охолодження; Сушення повітря; Скруббер; Холодильна машина

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1828>

© The Author(s) 2020. This article is an open access publication

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

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>**1. Вступ**

Карбамід (сечовина) – діамід вугільної кислоти. Карбамід використовується в великих кількостях в якості ефективного добрива і кормової добавки в тваринництві. Карбамід є найбільш концентрованою хімічною речовиною серед азотних добрив. Зміст в ньому азоту, що засвоюється рос-

линами, становить 46,3% крім аміаку.

В даний час як сам карбамід, так і різні продукти на його основі знаходять широке застосування не тільки в сільському господарстві і промисловості, але і в ряді інших галузей [1-6].

Виробництво карбаміду в наші дні здійснюється на заводах великотоннажної хімії, що випускають аміак і інші продукти. Хіміко-технологічне

обладнання, що використовується з цією метою, постійно модернізується. Цим забезпечується не тільки його надійна і безпечна робота, але одночасно зниження питомих витрат енергії та сировини, а також підвищення продуктивності карбамідних агрегатів.

Часто виявляється, що поліпшення перерахованих показників стримується недостатньою продуктивністю процесу приліровання карбаміду, який здійснюється в спеціальній грануляційній вежі (гранвежі). В неї знизу надходить повітря для охолодження вільно падаючих крапель плаву карбаміду.

При високих температурах навколишнього середовища (35 ... 40 °С) в літній період роботи наблюдалась погіршення процесів кристалізації, затвердіння і охолодження гранул карбаміду. У зв'язку з цим повітря, що подається в гранвежу напірним вентилятором К-664, відводить меншу кількість теплоти від гранул карбаміду і апарату «киплячого шару» (АКШ). В результаті продуктивний карбамід на виході з гранвежі приймає температуру, що перевищує 50 °С, і частково приймає вигляд сплюснутих гранул, які не мають твердої серцевини і тому схильні до злежування.

Для усунення зазначених недоліків було прийнято рішення про дослідження впливу осушення і охолодження повітря, що нагнітається в гранвежу, на збільшення виходу карбаміду і підвищення його якості. Розглядалися такі способи підготовки повітря:

- осушення повітря адсорбентами до температури точки роси -40 ... -60 °С.
- охолодження повітря в теплообміннику-випарнику холодильної машини до температури точки роси, що дорівнює 7 °С.
- охолодження повітря в порожнистому водяному форсуночному скруббері з використанням води, що охолоджується в теплообміннику-випарнику холодильної машини до температури +5 ... +7 °С.

Оцінимо ці способи обробки повітря, що подається в гранвежу, а також визначимо їх ефективність.

2. Аналіз параметрів зовнішнього повітря

Для розгляду зазначених способів осушення і охолодження повітря необхідно мати у розпорядженні дані про кількість вологи, що вноситься повітрям в гранвежу.

Відомо, що абсолютний вологовміст повітря

при 100-відсотковому його насиченні залежить тільки від температури і може змінюватися, як показано на рис. 1, в широких межах, наприклад, від 6,2 до 36,5 г вологи / кг повітря при підвищенні температури навколишнього середовища від 7 до 35 °С.

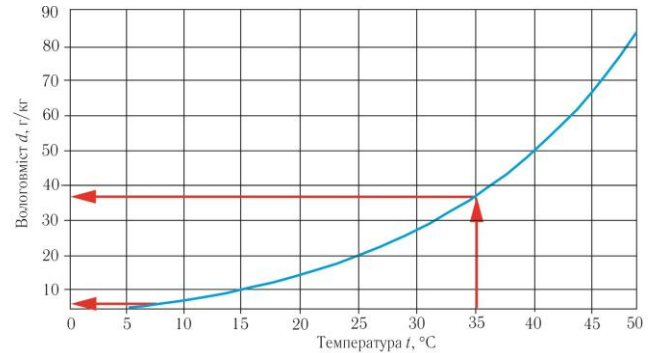


Рисунок 1 – Абсолютний вологовміст повітря

Реальний вміст вологи в повітрі характеризується його відносною вологістю ϕ . Для оцінки кількості вологи, що вноситься в гранвежу, встановимо, які значення в період травня 2019 р. становили такі параметри повітря: температура, вологість, точка роси. У цьому місяці, згідно метеоданих, максимальна температура повітря досягала 40 °С.

Були розраховані мінімальні, середні та максимальні значення температури, вологості і точки роси за травень місяць (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Усереднені параметри зовнішнього повітря за травень місяць

Значення	Температура °С	Вологість %	Точка роси, °С
Мінімум	13,92	29,24	1,98
Середні	19,53	59,70	5,95
Максимум	32,71	79,22	9,60

З табл. 1 видно, що протягом місяця в середньому температура повітря мала значення від 14 до 33 °С, вологість – 30 ... 80% і температура точки роси – 2 ... 10 °С.

З огляду на це для розрахунків і подальшого аналізу параметрів повітря, що подається в гранвежу, приймемо їх наступні середні значення: температура повітря 20 °С, відносна вологість 60%.

Серед вихідних даних важливим параметром, на який слід звернути особливу увагу, є температура точки роси. У зазначених в табл. 1 даних вона не перевищує 6 °С. Це означає, що при охоло-

дженні повітря від температури навколишнього середовища до температури точки роси $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ з нього не буде випадати волога. Тому охолодження повітря здійснюватимемо до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, що дозволить уникнути утворення конденсату на внутрішніх поверхнях теплообмінної апаратури і металоконструкцій. Досягнення цього значення температури можливо за допомогою парокомпресорної холодильної (ПХМ) або абсорбційної бромістолітєвої холодильної (АБХМ) машин, які скорочено будемо позначати як ХМ.

Трохи пізніше більш детально зупинимося на коректності використання в розрахунках зазначених в табл. 1 середніх значень параметрів зовнішнього повітря.

3. Порівняння способів підготовки повітря, що подається в гранвежу

Досліджуємо характеристики трьох зазначених способів осушення або охолодження зовнішнього повітря, що нагнітається в гранвежу.

Заміна вологи на додаткову кількість осушеного повітря, як впливає з першого способу, при однаковій потужності напірного вентилятора (номінальна продуктивність $450000\text{ м}^3/\text{год}$) незначною мірою підвищить ефективність охолодження карбаміду: від $0,6$ до $1,5\%$. Розміщення ж необхідних для цього адсорберів на всмоктуванні призведе до додаткового істотного гідравлічному опору, яке викличе втрату напору, створюваного вентилятором, а також вимагатиме значних витрат потужності на регенерацію адсорбентів. Сухе охолодження повітря не в змозі впливати на міцність якості гранульованого карбаміду і його повне затвердіння. У зв'язку з цим можна припустити, що доцільно замість осушки охолоджувати потік повітря на всмоктуванні перед напірним вентилятором.

Для реалізації другого розглянутого способу потрібно охолоджувати повітря в теплообміннику-випарнику, наприклад, парокомпресорній холодильній машині (ХМ) від 35 до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результаті в цьому процесі буде відбуватися також і осушення повітря. Холодопродуктивність ХМ при цьому складе $Q_x = 4,5\text{ МВт}$. Даний спосіб не позбавлений недоліків. Основний з них полягає в великих габаритах теплообмінника-випарника, обумовлених низьким коефіцієнтом теплопередачі від повітря до холодоагенту і великим гідравлічним опором апарату.

Крім цього, виявляється ще один недолік другого способу підвищення продуктивності гранвежі. Так, при охолодженні зовнішнього повітря з відносною вологістю 60% (див. табл. 1) в теплообміннику-випарнику ХМ від 20 і до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ньому буде накопичуватися конденсат. Пояснюється це тим, що при цих параметрах повітря температура точки роси t_p буде перевищувати $6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Покажемо це розрахунками, використовуючи [7].

З таблиці показників вологого повітря в [7] при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ знаходимо, що тиск насиченої водяної пари $p_{\text{нп}} = 2,3368\text{ кПа}$. З огляду на, що вологість повітря $\phi = 60\%$, знайдемо парціальний тиск водяної пари $p_{\text{п}} = \phi p_{\text{нп}} / 100 = 0,6 \times 2,3368 / 100 = 1,4020\text{ кПа}$. За формулою, що придатна для інженерних розрахунків, визначимо, що температура точки роси

$$t_p = (234,47 \ln p_{\text{п}} + 116,07) / (16,62 - \ln p_{\text{п}}) = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$$

При такому значенні температури точки роси охолодження повітря до $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ буде призводити до появи конденсату в теплообміннику-випарнику.

Щоб уникнути накопичення вологи в теплообміннику-випарнику ХМ, можна, в принципі, зовнішнє повітря охолоджувати до температури не нижче t_p , тобто $12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Однак при такій організації охолодження не вдасться досягти холодопродуктивності $Q_x = 4,5\text{ МВт}$.

При збільшенні витрати повітря для забезпечення все ж зазначеного значення Q_x обмежуючим фактором може виявитися неможливість істотного підвищення продуктивності вентилятора К-664А.

Для інтенсифікації роботи гранвежі скористаємось третім способом, при реалізації якого охолодження повітря організовується в порожнистому форсуночному водяному скруббері. У цій системі охолодження можна значно знизити габарити теплообмінника-випарника, так як його вдасться встановити на потоці циркулюючої в скруббері води, а не потоці повітря, як у другому способі.

Принципова схема зазначеної системи охолодження повітря наведена на рис. 2.

В системі, представлений на цьому рисунку, атмосферне повітря охолоджується і промивається в водяному скруббері потоком води, яка охолоджується в теплообміннику-випарнику холодильної машини (ХМ). Після цього повітря нагнітається напірним вентилятором К-664А в апарат «киплячого шару», який розташований в нижній частині гранвежі.

При відведенні в скруббері теплоти від повітря його температура знижується і стає рівною температурі води, яка подається на зрошення. Поряд з цим відбувається збільшення щільності повітря, що призводить до підвищення масової витрати повітря, що надходить в гранвежу. Таким чином, охолодження повітря на всмоктуванні в напірний вентилятор дозволить досягати низьких температур і, як наслідок, високих масових витрат, що необхідно для вирішення сформульованої задачі. Такий спосіб подачі володіє ще однією перевагою: повітря, що нагнітається в вежу, є промитим і очищеним від пилу і різних механічних включень. Використання чистого повітря буде сприяти підвищенню якості виробленого гранульованого карбаміду.

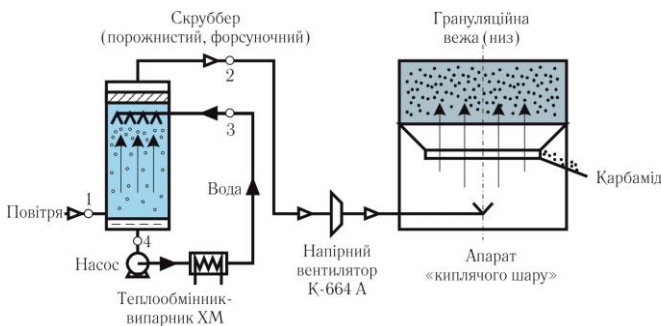


Рисунок 2 – Система охолодження повітря, що подається в гранвежу вентилятором К-664А

Для визначення показників третього способу вкажемо основні параметри вентилятора:

- заводське позначення вентилятора – К-664А (або К-664В);
- модель – АРА-12240 – вентилятор осьовий горизонтальний постійного тиску;
- діаметр робочого колеса – 2240 мм;
- потужність електродвигуна – 630 кВт;
- номінальна напруга – 6000В;
- номінальний струм – 76,1А;
- швидкість обертання – 744 хв⁻¹;
- тиск нагнітання – 350 мм вод. ст. (3,5 кПа);
- номінальна продуктивність – 450000 нм³ / год;
- робочий струм – 57,4 А;
- робоча продуктивність – 340000 нм³ / год;
- вентилятор навантажений по потужності на 75,43%;
- продуктивність гранвежі по карбаміду – 57 т / год.

Наведемо характеристики системи охолодження з урахуванням середніх параметрів зовнішнього повітря (див. табл. 1). При температурі 20 °С і відносній вологості 60% витрата повітря складе 413714 кг / год. У ньому міститься 0,83%

вологи, що відповідає об'ємної продуктивності 340000 нм³ / год.

Для більш повного аналізу роботи системи охолодження повітря (див. рис. 2) виконаємо розрахунки трьох варіантів подачі повітря в гранвежу, які будуть відрізнятися один від одного тільки умовами всмоктування повітря перед напірним вентилятором К-664А.

Перший варіант (існуючий) буде характеризувати літні умови роботи гранвежі при температурі зовнішнього повітря 35 °С.

Другий варіант (також існуючий) буде відповідати нормальних умов роботи вежі при температурі 20 °С.

Третій варіант має відношення до пропонованої системи охолодження (див. рис. 2), коли температура повітря, що обробляється в скруббері знижується від 35 до 7 °С.

Це дозволить оцінити вплив процесів охолодження на зміни теплових навантажень на псевдозріджений шар в апараті «киплячого шару» і відповідно на можливе збільшення виробництва гранульованого карбаміду при одній і тій же встановленій потужності напірного вентилятора К-664А.

Таблиця 2 – Результати розрахунку робочих показників скруббера.

Вхід	Т.1 – зовнішнє повітря	Т.3 – охолоджуюча вода з ХМ
Тиск, МПа	0,1	0,1
Температура, °С	35	7
Витрата, кг/год	431999,900	800000,100
Вихід	Т.2 – охолоджувальне повітря	Т.4 – вода на охолодження
Тиск, МПа	0,1	0,1
Температура, °С	7	11,1
Витрата, кг/год	431215,100	800784,900

Примітка: Точки 1-4 показані на схемі системи охолодження повітря (див. рис. 2)

Спочатку визначимо робочі характеристики водяного скруббера при охолодженні повітря від 35 до 7 °С, тобто при експлуатації його в літніх умовах. Задамося наступними даними:

- температура повітря на вході в скруббер – 35 °С;
- кількість вологи в повітрі – 1,28% об;
- температура повітря на виході з скруббера – 7 °С.

Результати виконаних різноманітних розра-

хунків показників повітря і води на вході в скруббер і виході з нього зведені в табл. 2.

При розрахунках реалізованих в скруббері процесів тепло- і масообміну використовувалися рекомендації, викладені в [8, 9].

В результаті була визначена витрата води в скруббері – $800 \text{ м}^3 / \text{год}$ і її кінцева температура на виході з нього – $11,1 \text{ }^\circ\text{C}$, а також температура і кількість повітря після охолодження, відповідно, $7 \text{ }^\circ\text{C}$ і $431215,2 \text{ кг} / \text{год}$ ($360\,000 \text{ нм}^3 / \text{год}$). У подальших розрахунках підвищимо температуру води на виході з скруббера до $12 \text{ }^\circ\text{C}$.

Параметри циркуляційної води в скруббері в результаті будуть наступними:

- витрата води – $800 \text{ м}^3 / \text{год}$;
- температура на вході – $7 \text{ }^\circ\text{C}$;
- температура на виході – $12 \text{ }^\circ\text{C}$;
- тиск води на вході – $0,3 \text{ МПа}$;
- споживана циркуляційним насосом потужність – $65,5 \text{ кВт}$.

При зазначених температурах води на вході і виході зі скруббера холодопродуктивність високо-температурної холодильної машини $Q_x = 4,5 \text{ МВт}$ (теплове навантаження теплообмінника-випарника, відповідає охолодженню $800 \text{ м}^3 / \text{год}$ води від 12 до $7 \text{ }^\circ\text{C}$). Масова витрата повітря на виході з скруббера при температурі $7 \text{ }^\circ\text{C}$ складе 431215 кг/год або $360000 \text{ нм}^3 / \text{год}$. Отримані результати відповідають третьому варіанту подачі повітря в грануляційну вежу.

Аналіз даних, зазначених у табл. 2, показує, як значно не тільки охолоджується, а й осушується зовнішнє повітря. Волога з повітря при цьому відводиться до циркулюючої в скруббері воді. В даному випадку осушення повітря в результаті його охолодження викликає зменшення витрат з $431999,9$ до $431215,1 \text{ кг/год}$, тобто на $784,8 \text{ кг/год}$. Волога ж в цій кількості переходить в воду, викликаючи зростання її витрат без будь-яких додаткових витрат. Повітря, таким чином, осушується, незважаючи на те, що його вологість досягає 100% .

Аналогічно визначимо продуктивність напірного вентилятора при його роботі в першому і другому варіантах подачі повітря, які відображають існуючий стан справ з подачею повітря при зміні температури навколишнього середовища.

Відзначимо, що об'ємні витрати повітря становлять 320000 і $340000 \text{ нм}^3 / \text{год}$, відповідно, при температурах навколишнього середовища, рівними 35 і $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Зростання температури повітря призводить до зниження продуктивності напірного

вентилятора і до зменшення кількості теплоти, що відводиться від апарату «киплячого шару». Крім об'ємної продуктивності, необхідно розраховувати масову продуктивність і температуру повітря після нагнітання його напірним вентилятором, тобто температуру повітря на вході в апарат «киплячого шару», яка, як відомо, буде вище температури навколишнього середовища, так як охоложене повітря в процесі стиснення в вентиляторі буде трохи нагріватися за рахунок підведення до повітря теплоти, еквівалентній потужності вентилятора.

Також слід оцінити зміну потужності електродвигуна вентилятора при збільшенні навантаження. Для цього визначимо масову продуктивність вентилятора, споживану потужність електродвигуна і температуру повітря на виході з вентилятора К-664А при різних температурах повітря на всмоктуванні. Результати розрахунків зведемо в табл. 3.

Таблиця 3 – Усереднені параметри зовнішнього повітря за травень місяць

Параметри	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3
Температура повітря на всмоктуванні, $^\circ\text{C}$	35	20	7
Витрата повітря, віднесена до н.у., $\text{нм}^3 / \text{ч}$	320 000	340 000	360 000
Масова витрата повітря, кг/год	381 688	413 249	431 215
Напор, що створюється, ммвод.ст.	350	350	350
Температура повітря, що нагнітається вентилятором, $^\circ\text{C}$	40	24	11
Споживана вентилятором, потужність, кВт	471,7	477,4	484,4

З табл. 3 видно, що при підвищенні температури навколишнього середовища до 35 або зниженні її до $7 \text{ }^\circ\text{C}$ продуктивність по повітрю може змінюватися на 6% ($20000 \text{ нм}^3 / \text{год}$ або 25000 кг/год) в ту чи іншу сторону по відношенню до нормальних умов роботи (варіант № 2), що відповідають температурі навколишнього середовища $20 \text{ }^\circ\text{C}$ і вологості 60% . При таких коливаннях продуктив-

ності потужність електродвигуна вентилятора буде змінюватися на 1,5%. Навантаження електродвигуна вентилятора в середньому складе 76% 1,5%.

Торкнемося переваг пропонованої системи охолодження повітря (рис. 2), які наочно ілюструє табл. 3. З неї випливає, що замість 320000 $\text{нм}^3/\text{год}$ (381688 $\text{кг}/\text{год}$) повітря при температурі 40 °С в апарат «киплячого шару» буде подаватися 360000 $\text{нм}^3/\text{год}$ (431215 $\text{кг}/\text{год}$) повітря при температурі 11 °С, тобто на 12% (40000 $\text{нм}^3/\text{год}$ або 50000 $\text{кг}/\text{год}$) більше повітря і при більш низькій температурі, зниженій майже на 30 °С. Це дозволить збільшити продуктивність вежі по гранульованому карбаміду. Споживана потужність при цьому збільшиться всього на 3%, що не призведе до істотного перевантаження електродвигуна напірного вентилятора К-664А.

Однак, щоб зробити остаточний висновок про ефективність подачі охолодженого повітря в апарат «киплячого шару», необхідно визначити витрати потужності на охолодження циркулюючої води в скруббері. Проаналізуємо характеристики, що підходять для цієї мети, холодильних машин, які можуть бути компресорними або абсорбційними.

4. Характеристики водоохолоджуючих холодильних машин

Для охолодження циркулюючої в скруббері води можна використовувати аміачний компресорний агрегат типу WRV-321-132 (рис. 3) на базі гвинтових компресорів фірми «Howden» (Шотландія) з температурами кипіння -10 °С і конденсації 35 °С. Холодопродуктивність одного агрегату складе – 2380 кВт. Споживана потужність – 632 кВт. Необхідна кількість ХМ – 2 шт. Сумарна холодопродуктивність підібраних гвинтових агрегатів складе 4,76 МВт. Сумарна споживана потужність – 1264 кВт.



Рисунок 3 – Аміачний компресорний агрегат моделі WRV-321-132

Гарними характеристиками володіє холодильна машина з відцентровими компресорами моделі WDC-100 виробництва компанії «McQuay» (США), яка оснащена двома відцентровими напівгерметичними одноступеневими компресорами, що працюють на R134a (рис. 4).



Рисунок 4 – Чіллер моделі WDC-100 з двома відцентровими компресорами

Холодопродуктивність моделі WDC-100 – 4650 кВт. Споживана потужність – 750,7 кВт. Витрата води на охолодження конденсатора – 960 $\text{м}^3/\text{год}$. Температура кипіння 7 °С, температура конденсації 30 °С; холодильний коефіцієнт – 6,19. Регулювання холодопродуктивності можливо від 20 до 100%.

При наявності водяної пари низьких параметрів можна буде замість компресорної холодильної машини використовувати абсорбційну бромістолітєву холодильну машину (АБХМ) моделі BS-400 (рис. 5), що має наступні характеристики: холодопродуктивність – 4652 кВт; витрата води на охолодження – 981 $\text{м}^3/\text{год}$; витрата пара – 5 т/год при тиску 0,35-0,60 МПа; споживана потужність – 10,3 кВт.



Рисунок 5 – Абсорбційна бромістолітєва холодильна машина моделі BS-400

Споживання енергії на охолодження повітря ($Q_x = 4,5$ МВт) до 7 °С за допомогою скруббера з використанням холодильної машини з гвинтовим компресором типу WRV-321-132 складе 1330 кВт; в разі застосування АБХМ моделі BS-400 – 80 кВт

і 5 т/год водяної пари з тиском до 0,60 МПа; в разі холодильної машини моделі WDC-100 – 816 кВт.

З порівняння характеристик компресорних холодильних машин слідкує, що більш доцільним є чиллер моделі WDC-100 компанії «McQuay», що дозволяє плавно в автоматичному режимі регулювати холодопродуктивність. Дані чиллери володіють високим холодильним коефіцієнтом, що досягає 6,19. Це дозволяє в порівнянні з аміачною компресорної холодильної машиною (WRV-321-132) економити 40% електроенергії.

Вибір холодильної машини повинен здійснюватися на основі технологічних і техніко-економічних розрахунків.

5. Оцінка можливого збільшення продуктивності грануляційної вежі

Висновок про можливе підвищення продуктивності грануляційної вежі в літній період роботи необхідно робити на основі аналізу роботи апарату «киплячого шару», в якому відбувається остаточне охолодження і затвердіння гранул карбаміду.

Для цього потрібно визначити кількість теплоти, що відводиться «киплячим шаром», при конкретних витратах і температурах повітря, що подається на охолодження гранульованого карбаміду.

Наведемо основні характеристики грануляційної вежі:

- діаметр грануляційної вежі – 12 м;
- діаметр решітки апарату «киплячого шару» – 8 м;
- висота польоту плаву карбаміду – 85 м;
- температура плаву, що подається – 140 °С;
- температура кристалізації карбаміду – 132...133 °С;
- температура карбаміду на вході в АКС – 80 °С;
- різниця температур в АКС – 30 ... 40 °С;
- температура гранул на транспортері – 30 °С;
- продуктивність вежі по карбаміду – 57 т/год.

З наведених даних видно, що гранульований карбамід на вході в АКС має температуру 80 °С. Температура повітря, що проходить через АКС, залежить від температури навколишнього середовища і постійно змінюється, наприклад, від 40 до 11 °С. Для визначення теплового навантаження АКС приймемо температуру повітря на виході з апарату, що дорівнює 60 °С у всіх розглянутих варіантах. Це дозволить забезпечити певну різницю температур між вхідним в АКС гранульованим карбамідом і повітрям, що виходить з АКС, а також оцінити кількість відведеної теплоти від гранул

карбаміду в апараті «киплячого шару». Отримані результати розрахунків зведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Характеристики роботи апарату «киплячого шару»

Параметри	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3
Температура повітря на вході, °С	40	24	11
Температура повітря на виході, °С	60	60	60
Витрата повітря, віднесена до н.у., $\text{нм}^3/\text{ч}$	320 000	340 000	360 000
Масова витрата повітря, кг/год	381 688	413 249	431 215
Теплове навантаження АКС по повітрю, кВт	2712	4610	6475

З табл. 4 видно, що при підвищенні температури повітря на вході в АКС до 40 °С або зниженні її до 11 °С з одночасним збільшенням кількості повітря, що подається, теплове навантаження на АКС буде змінюватися на 40% (1900 кВт) в ту чи іншу сторону по відношенню до нормальних умов роботи (варіант № 2).

Це свідчить про те, як сильно впливає температура повітря, яке надходить в вежу, на роботу АКС. Тому основним завданням є стабілізація температури повітря, що подається в АКС, за рахунок його охолодження.

Навіть при повному навантаженні напірного вентилятора, що відповідає його номінальній продуктивності 450000 $\text{нм}^3/\text{год}$ і споживаній потужності 660 кВт, тепла потужність АКС складе 3815 кВт (при температурі повітря 40 °С на вході в нього), що все одно нижче на 17% в порівнянні з нормальними умовами роботи.

Якщо ж не збільшувати витрату повітря, а залишити її постійною, наприклад, на рівні 320000 $\text{нм}^3/\text{год}$, що відповідає температурі навколишнього середовища 35 °С, але охолодити його в скруббері до 7 °С, то тепла потужність АКС складе 5743 кВт, що на 25% (1133 кВт) більше, ніж за нормальних умов роботи (варіант № 2).

Розрахунки показують, що зростання продуктивності грануляційної вежі по карбаміду пропорційний підвищенню кількості теплоти, що відводиться від апарату «киплячого шару». Це під-

тверджується табл. 5.

Таблиця 5 – Продуктивність гранвежі по карбаміду

Параметри	Варіант №1	Варіант №2	Варіант №3
Продуктивність по карбаміду, т/год	47	57	71
Продуктивність по карбаміду, т/доба	1129	1368	1704
Зміна продуктивності, т/доба (відносно варіанту №2)	- 240	-	+ 336

З табл. 5 випливає, що при роботі грануляційної вежі відповідно до варіанту № 2 продуктивність по карбаміду становить 57 т/год або +1368 т/добу. При зміні температури навколишнього середовища від 35 °С до 7 °С добова продуктивність грануляційної вежі може змінюватися від мінус 236 т до плюс 336 т.

Якщо в грануляційну вежу подавати до 1700 т/добу плаву, як у варіанті № 3, то з'являється реальна можливість збільшення виходу гранульованого карбаміду до 71 т/год.

Однак таке зростання продуктивності повинне розглядатися як граничний випадок, що вимагає знаходження конструктивних, технологічних і експлуатаційних резервів карбамідного виробництва і їх реалізації. Це – перспективна розробка для її впровадження не тільки в існуючі, а й перш за все в створювані гранвежі для нових виробництв карбаміду. Створення більш ефективних веж – актуальне завдання [10].

Але вже зараз, як показано, можна отримати великий економічний ефект за рахунок організації стабільної роботи гранвежі, коли щодоби в ній виробляється 1368 т гранульованого карбаміду у відповідності до варіанту № 2 (див. таблиці 4 і 5). Якщо звернутися до метеоумов, то з них видно, що протягом майже півроку, тобто в період травень-жовтень місяці, необхідно використовувати запропоновану систему охолодження і осушення зовнішнього повітря (див. рис. 2). Це дозволить гранвежу в жарку пору року перевести з варіанту № 1 на варіант № 2. В результаті її добова продуктивність зросте по карбаміду на 240 т. У цілому це дозволить протягом року виробити додатково

40000 т гранульованого карбаміду.

При подальшому підвищенні ефективності виробництва карбаміду подача в гранвежу 1700 т/добу плаву дасть можливість збільшити його вихід на 336 т/добу. або на 24,6%. Вироблений карбамід після затвердіння матиме температуру 15-20 °С.

6. Висновки

Збільшення виробництва карбаміду, особливо в літній період роботи, є актуальним завданням. Для підвищення продуктивності гранвежі збільшують подачу плаву на гранулювання. При деякій збільшеній витраті карбаміду гранули будуть укріпляти тільки зовні. Через це при зберіганні він може саморозігріватися і, як наслідок, злежуватися.

Щоб цього уникнути, були розроблені і проаналізовані кілька способів збільшення продуктивності гранвежі з відносно невеликими капітальними і експлуатаційними витратами. Також виконано оцінку впливу осушення і охолодження повітря, що подається в апарат «киплячого шару», на вихід карбаміду з гранвежі.

Розглядалися три способи збільшення продуктивності гранвежі.

Недолік першого способу полягає в тому, що тільки осушене до температури точки роси –40... –60 °С повітря не зможе збільшити навантаження на апарат «киплячого шару», в якому завершується процес гранулювання.

Основний недолік другого способу полягає в конденсації вологи в каналах теплообмінника-випарника, за якими проходить охолоджуване повітря.

Відповідно до третього способу охолодження повітря організовується в порожнистому водяному скруббері за рахунок розпилення зверху холодної води. Такий тепломасообмінний апарат буде мати низький гідравлічний опір. Холодна вода може вироблятися в абсорбційній бромістолітєвій холодильній машині при наявності пари низьких параметрів або в пароконпресорній холодильній машині. Розроблено принципову схему системи охолодження повітря, що подається в грануляційну вежу вентилятором К-664А. Визначено місце установки водяного скруббера.

При використанні запропонованої системи охолодження повітря в водяному скруббері від температури навколишнього середовища 35 до 7 °С вдається в апарат «киплячого шару» подавати 360000

м³/год при температурі 11 °С замість 320000 м³/год при температурі 40 °С, тобто на 12% (40000 м³/год або 50000 кг/год) більше повітря і при більш низькій температурі, зменшеній майже на 30 °С. Споживана потужність при цьому може збільшитися всього на 3%, що не призведе до істотного навантаження на електродвигун напірного вентилятора К-664А.

Отримані результати, як показано в статті, можуть використовуватися для підвищення ефективності карбамідного виробництва в наступних напрямках:

1. Для забезпечення стабільної роботи гранвежі в жаркий період року, коли температура зовнішнього повітря сягає 35...40 °С. У наведеному прикладі показано, що при наявності 1368 т плаву карбаміду можна, не знижуючи продуктивності, отримати додатково в рік 40000 т гранульованого карбаміду. При роботі в таких режимах запропонована система охолодження (див. рис. 2) використовується не на повну потужність.

2. Для значного підвищення виробництва карбаміду або створення нової гранвежі. У розглянутому прикладі показано, що при необхідному виробництві плаву карбаміду можна добову продуктивність гранвежі збільшити до 1704 т, застосовуючи розроблену систему охолодження зовнішнього повітря. У разі створення нової гранвежі на основі виконаних досліджень її габарити можуть бути зменшені у зв'язку із збільшеною подачею в неї охолодженого і осушеного повітря.

Показано розрахунками, що збільшення виходу карбаміду може забезпечуватися за допомогою одного і того ж вентилятора К-664 А.

Література

1. Кучерявий В. І., Лебедєв В. В. Синтез і застосування карбаміду. – М.: Хімія, 1970. – 448 с.
2. Горловський Д. М., Альтшулер Л. Н., Кучерявий В. І. Технологія карбаміду. – Л.: Хімія, 1981. – 320 с.
3. Сергєєв Ю. А., Кузнєцов Н. М., Чирков А. В. Карбамід: властивості, виробництво, застосування. – Нижній Новгород: Кварц, 2015. – 543 с.
4. Казакова О. О. Гранулювання і охолодження в апаратах з киплячим шаром. – М.: Хімія, 1973. – 152 с.
5. Казакова О. О. Гранулювання і охолодження азотовмісних добрив. – М.: Хімія, 1980. – 288 с.
6. Классен П. В., Гришасєв І. Г. Основні процеси технології мінеральних добрив. – М.: Хімія, 1990. – 304 с.
7. Кузнєцов Ю. В., Кузнєцов М. Ю., Березій А. А. Стиснене повітря. – Єкатеринбург; УРО РАН, 2012. – 554 с.
8. Писарєв Ю. Г., Лебедєв Л. Б., Довбиш А. Л. Удосконалення системи попереднього охолодження повітророзподільних установок // Технічні газ. – 2004. – № 4. – С. 18-23.
9. Лавренченко Г. К., Швець С. Г., Копитін А. В. Водовипарне охолодження повітря в повітророздільних установках середньої продуктивності // Технічні газ. – 2004. – №4. – С. 29-36.
10. Сергєєв Ю. А., Андержанов Р. В. Поліпшення промислових процесів прілірування карбаміду в потоках // Технічні газ. – 2015. – №3. – С. 35-43.

Отримана в редакції 11.01.2020, прийнята до друку 03.03.2020

Improving the performance of the granulation tower of urea production

G. Lavrenchenko¹✉, B. Hrudka²✉

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

²Odessa National Academy of Food Technologies, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082, Ukraine

✉ e-mail: ¹lavrenchenko.g.k@gmail.com; ²bogdangennadievich@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-8239-7587>; ²<https://orcid.org/0000-0003-1200-5442>

Intensification of large-scale urea production is an urgent task. One of the factors restraining the increase in urea production is the insufficient performance of the granulation tower, in which outside air is supplied from below to cool the freely falling drops of urea alloy. Three methods of preparation of air supplied to the lower part of the granulation tower are considered. It is shown that the first two methods cannot significantly increase the tower productivity. The third method has great capabilities, in the implementation of which air cooling is organized in a hollow nozzle water scrubber. With this approach,

it is also possible to significantly reduce the dimensions of the heat exchanger-evaporator, since it can be installed on the stream of water circulating in the scrubber, and not on the air stream. Calculations have been made for three options for air supply to the granulation tower, which differ from each other in the conditions of air intake in front of the K-664A (or K-664V) pressure axial fan. The first option meets the summer operating conditions of the tower, when the outside air temperature is 35 °C. The second option corresponds to normal operating conditions at an air temperature of 20 °C. When using the third option, it was assumed that the temperature of the air processed in the scrubber decreases from 35 to 7 °C. The calculations were carried out taking into account not only the changing temperature and relative humidity of the outside air, but also the supply of heat to the processed air, which is equivalent to the power of the forced fan. The conditions of heat exchange between heated air and cooled urea in the fluidized bed apparatus were taken into account. The performed calculations allow using the aggregated machine WOC-100 manufactured by «McQuay» (USA) for air cooling with two centrifugal compressors operating on R134a. When the granulation tower operates according to the second option, when in hot weather (May-October) air is supplied to it, cooled in a scrubber to 20 °C, approximately 40,000 tons of granular urea can be produced additionally.

Keywords: Urea; Granulation; Granulation tower; Cooling; Air drying; Scrubber; Refrigeration machine

References

1. **Kucheryavyj, V. I., Lebedev, V. V.** (1970). Synthesis and application of urea. *M.: Khimiya*, 448.
2. **Gorlovskiy, D. M., Altshuler, L. N., Kucheryavyj V.I.** (1981). Urea technology. *L.: Khimiya*, 320.
3. **Sergeev, Yu. A., Kuznetsov, N. M., Chirkov, A. V.** (2015). Carbamide: properties, production, application. *Nizhniy Novgorod: Kvarts*, 543.
4. **Kazakova, E. A.** (1973). Granulation and cooling in fluidized bed devices. *M.: Khimiya*, 152.
5. **Kazakova, E. A.** (1980). Granulation and cooling of nitrogen-containing fertilizers. *M.: Khimiya*, 288.
6. **Klassen, P. V., Grishaev, I. G.** (1990). The main processes of mineral fertilizer technology. *M.: Khimiya*, 304.
7. **Kuznetsov, Yu. V., Kuznetsov, M. Yu., Bereziy, A. A.** (2012). Compressed air. *Ekaterinburg; UrO RAN*, 554.
8. **Pisarev, Yu. G., Lebedev, L. B., Dovbish, A. L.** (2004). Air separation plants initial cooling systems updating. *Tekhnicheskie Gazy*, 4, 18-23.
9. **Lavrenchenko, G. K., Shvets, S. G., Kopyitin, A. V.** (2004). Water-evaporating cooling of air in air separation plants of average productivity. *Tekhnicheskie Gazy*, 4, 29-36.
10. **Sergeev, Yu. A., Anderzhanov, R. V.** (2015). Improving industrial processes prilling carbamide in flow of air or carbon dioxide. *Tekhnicheskie Gazy*, 3, 35-43.

Received 11 January 2020
 Approved 03 March 2020
 Available in Internet 04 July 2020