

ment. Production using pyrolysis spends a lot of heat in the process of selection of the product, so there is an opportunity to significantly improve the technical and economic performance using plasma process, but these measures have not been ever brought in real life. If we consider the process of production of reactive acetylene gas using dimethylformamide, it is certain that a large amount of dimethylformamide can spend to achieve the level of concentration in the reaction of acetylene gas. Only the following reasons, the quality of the incoming gas mixture can vary significantly. In this regard, we seek such factors by which the process will be more meet feasibility requirements and reduce the impact on the environment.

The manufacture of acetylene gas from the reaction gases is designed to produce high quality acetylene by mass transfer processes taking place in absorbers.

The process of mass transfer in the absorber is one of the most important steps in being saturated with acetylene production cycle. Production of acetylene from the reaction gas is the most economical way of obtaining acetylene because all unused products in the process of returning to a pure storage, where they can be used again in the process. The research on real objects is expensive, very difficult and dangerous, so this improvement is relevant and necessary.

To solve the problems of design of process equipment, synthesis and study of control systems the challenge of obtaining the mathematical model of the process object that best reproduce the properties of real prototype to a wide range of operation. For this purpose, a mathematical model is needed, which would most closely corresponds to the actual and also based on the complexity of the device and the usage of simplifications, which could be neglected.

Today we know a few models of packed absorbers, including regression models and mathematical models are based on the theory of fuzzy logic and fuzzy set theory. However, most of them do not allow simulating the dynamics of the process, and thus make it impossible to optimize dynamic processes.

**Keywords:** acetylene, packed absorber, reaction gases, the mathematical model.

УДК 66.041.454

ЖУЧЕНКО А. І., д.т.н., проф.; МАТВІЄНКО О. І., магістрант  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»

## МОДЕЛЮВАННЯ РЕАКЦІЙНИХ ТРУБ ПЕЧІ ТРУБЧАСТОГО ТИПУ В КОНВЕРСІЇ МЕТАНУ

Проаналізовано математичну модель реакційної труби печі трубчастого типу – основного апарата на першій стадії конверсії метану. Одержано систему диференціальних рівнянь для подальших досліджень.

**Ключові слова:** конверсія метану, реакційна труба, піч трубчастого типу, математична модель.

© Жученко А. І., Матвієнко О. І., 2014.

**Постановка проблеми.** Парова каталітична конверсія метану в трубчастих печах є найбільш економічним способом одержання технологічного газу й водню. Відомо декілька моделей печей трубчастого типу, зокрема регресійні й побудовані на основі теорії нечіткої логіки та теорії нечітких множин [1]. Проте вони не дозволяють моделювати динаміку процесу конверсії, що робить неможливим його оптимізацію.

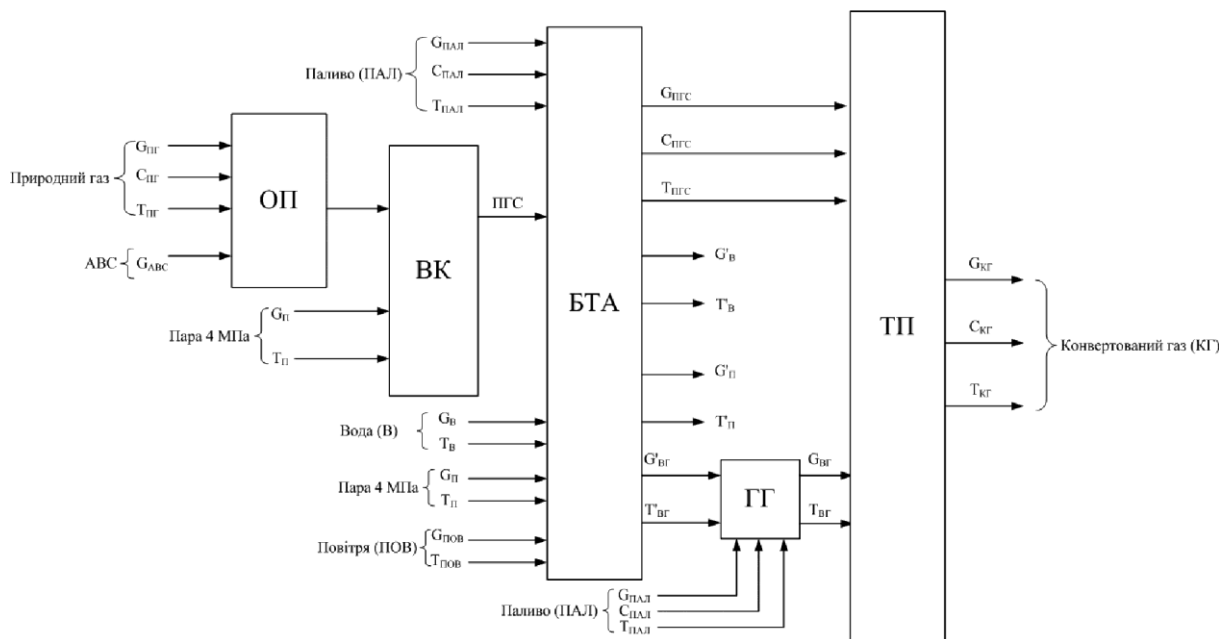
**Метою статті** є розроблення математичної моделі реакційних труб печі трубчастого типу, де відбувається конверсія метану.

**Виклад основного матеріалу.** Основним об'єктом парової конверсії є трубчаста піч, в якій відбувається високотемпературний каталітичний риформінг вуглеводневих з'єднань. Для створення її математичної моделі зроблено такі припущення: у поперечному й поздовжньому перерізах відбувається ідеальне витіснення; сировина займає весь переріз; теплові втрати в навколишнє середовище відсутні.

Аналіз трубчастої печі як об'єкта керування дозволяє виділити сукупність взаємопов'язаних вхідних і вихідних координат (рис. 1, 2):

– вектор вхідних незалежних змінних:  $G_{\text{пр}}$  – витрата природного газу, що йде на конверсію;  $G_{\text{п}}$  – витрата водяної пари середнього тиску, що спрямовують на змішування з природним газом;  $G_{\text{пал}}$  – витрата палива, що надходить на газові пальники;

– вектор вихідних змінних: концентрація компонентів КГ  $C_{\text{кг}}$  (головним показником є вміст метану в конвертованому газі), кількість конвертованого газу  $G_{\text{кг}}$ , його температура  $T_{\text{кг}}$  і тиск  $P_{\text{кг}}$  на виході з печі;



ВП – вогневий нагрівник; ВК – вхідний колектор; БТА – блок теплообмінної апаратури;  
ГГ – газові горілки; ТП – трубчаста піч

Рис. 1 – Структурно-параметрична схема процесу конверсії метану

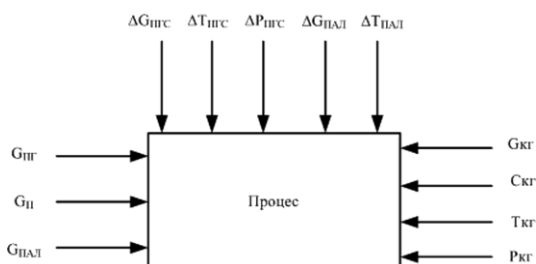


Рис. 2 – Схема об'єкта оптимізації

– вектор збурень:  $\Delta G_{\text{ПГС}}$  – варіювання витрати парогазової суміші, що надходить до печі;  $\Delta C_{\text{ПГС}}$  – варіювання складу парогазової суміші;  $\Delta P_{\text{ПГС}}$  – варіювання тиску парогазової суміші в печі;  $\Delta G_{\text{ПАЛ}}$  – варіювання витрати палива;  $\Delta T_{\text{ПАЛ}}$  – варіювання температури палива. Можна виокремити такі групи збурень: некеровані зміни фізико-хімічних властивостей сировини ( $\Delta G_{\text{ПАЛ}}$ ,  $\Delta C_{\text{ПАЛ}}$ ,  $\Delta P_{\text{ПАЛ}}$ ); зміни властивостей каталізатора (отруєння, закоксовування, дезактивація); зміни властивостей теплообмінних поверхонь (вигорання, корозія, відкладення солей); зміни розподілу навантаження через відмову реакторів печі.

За стаціонарного режиму конверсію в трубах, що обігріваються ззовні, можна описати системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} D_r \left( \frac{\partial^2 C_i}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) - w \frac{\partial C_i}{\partial x} - \omega_i = m \frac{\partial C_i}{\partial t} \\ \lambda_r \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - c_p w \frac{\partial T}{\partial x} - \sum \Delta H_i \omega_i = S C_{\text{КГ}} \rho_{\text{КГ}} \frac{\partial T}{\partial t} \\ \frac{\Delta P}{L} = \frac{L \omega^2 \gamma a}{2g \varepsilon^3} f_e \\ \omega_i = k_0 \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right) C_{\text{ікл}} \end{cases}$$

де  $r, x$  – координати радіуса й довжини труб;  $t$  – координата за часом;  $w$  – швидкість потоку;  $\lambda_r$  – ефективна теплопровідність у поперечному напрямку;  $D_r$  – ефективний коефіцієнт дифузії в поперечному напрямку;  $\omega_r$  – спостережувана швидкість реакції;  $\sum \Delta H_i \omega_i$  – сумарний тепловий ефект;  $C_i$  – концентрація конвертованого газу;  $T$  – температура конвертованого газу;  $S$  – площа поперечного перерізу реакційних труб;  $C_{\text{КГ}}$  – питома масова теплоємність конвертованого газу;  $\rho_{\text{КГ}}$  – густина конвертованого газу;  $k_0$  – константа швидкості реакції нульового порядку;  $E_i$  – кінетичний параметр.

Відповідні межові умови:  $\left. \frac{\partial C_i}{\partial r} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=0} = 0$ ;  $\lambda_r \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha (T_{ст} - T|_{r=R})$ ;  $T|_{x=0} = T_0$ ;  $C_i|_{x=0} = C_{i0}$ , де  $\alpha$  –

коефіцієнт тепловіддачі від внутрішньої поверхні труби з урахуванням теплового випромінювання. При цьому для парової конверсії достатньо розрахунку двох концентрацій  $\text{CH}_4$  і  $\text{CO}_2$  ( $i = 1, 2$ ).

**Висновок.** Розроблено математичну модель реакційних труб печі трубчастого типу в конверсії метану. У подальшому за допомогою одержаної математичної моделі будуть розраховані профілі температур і концентрацій. Доцільно також перетворити одержану систему диференціальних рівнянь у передатні функції за каналами «керування» і «збурення» за допомогою перетворення Лапласа та скористатися програмним пакетом Autodesk Simulation CFD.

#### Список використаної літератури

1. Кривов М. В. Моделирование и оптимизация нечеткоопределенных технологических процессов (на примере процесса паровой конверсии углеводородов) : дисс. ... канд. техн. наук / М. В. Кривов. – Ангарск, 2000. – 154 с.

Надійшла до редакції 25.03.2014.

Zhuchenko A. I., Matvijenko O. I.

#### MODELING OF REACTION TUBES OF TUBE TYPE FURNACE FOR METHANE CONVERSION

*The most famous technologies of making hydrogen are based on chemical and thermal processes also on electrolysis of water. However, they major shortcomings as the use of high potential energy to the costs of fossil fuels and therefore significant pollution. The disadvantage of electrolysis of water is a significant level of power consumption. Electrolytic hydrogen is the available, but more expensive product. Today, the world's largest distribution obtained technology of developing hydrogen or a mixture of hydrogen and other gases by steam reforming of natural gas – methane. But almost half of the initial volume of gas consumed in carrying out endothermic steam reforming process. So the world is making an intensive search for such technologies that produces hydrogen, which would meet the requirements of economic and energy efficiency and environmental safety.*

*The process of steam reforming of hydrocarbon compounds designed to produce hydrogen technology and other process gases by high-temperature catalytic reforming in the cycle of production of synthesis gas. The process of conversion is one of the most important stages of the process of obtaining gas in ammonia synthesis loop. Despite the complexity of hardware design, steam catalytic conversion of methane in the furnace tube is currently the most economical way to get the process gas and hydrogen.*

*Therefore, to improve it is relevant and necessary scientific and technical challenge. Given that the full-scale study of the process of conversion is expensive, very difficult and dangerous. To solve the problems of design of process equipment, synthesis and study of control systems, simulators technical personnel, the challenge of obtaining the mathematical model of the process object that will best reproduce the properties of real prototype to a wide range of operation. However, creating of a model is based on a compromise between the complexity of the mathematical tools and depth of simplifications and neglects. Today we know a few tube type furnace models, including regression models, which are widely used because of its ability to approximate analytical relationship between input, output variables for multiple passively or actively conducted experiments, and mathematical models are based on the theory of fuzzy logic and fuzzy set theory. The general scientific problem is that with most of them do not allow modeling the dynamics of the process and, therefore, not part of the unsolved scientific problem is that it makes it impossible to optimize dynamic processes.*

**Keywords:** conversion of methane, the reaction tube, tube type furnace, the mathematical model.

#### References

1. Krivov M. V. Modelirovanie i optimizacija nechetkoopredelennyh tehnologicheskikh processov (na primere processa parovoj konversii uglevodorodov) [Modeling and optimization of ill-defined processes (for example, process steam conversion of hydrocarbons)] : diss. ... kand. tehn. nauk / M. V. Krivov. – Angarsk, 2000. – 154 s.

УДК 676.056.521.1

ЖУЧЕНКО А. И., д.т.н., проф.; ЧЕРЁПКИН Е. С., асс.  
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГРЕВА БУМАЖНОГО ПОЛОТНА В СУШИЛЬНОЙ ЧАСТИ БУМАГОДЕЛАТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

*Рассмотрены вопросы тепло- и массопереноса на первом этапе сушки бумажного полотна, в частности тепло- и массообмен между сушильным цилиндром и бумажным полотном, окружающей средой и бумажным полотном, а также перенос теплоты и влаги в материале. Проанализирована физика процессов, получены уравнения для расчета температуры и влажности крайнего и центрального слоя бумаги при прохождении через сушильный цилиндр и на участке свободного хода.*

**Ключевые слова:** бумагоделательная машина, математическая модель, сушильная часть, первый этап сушки, температура, влажность.

© Жученко А. И., Черёпкин Е. С., 2014.

**Постановка проблемы.** Процесс производства бумаги проходит на бумагоделательной машине (БДМ) и состоит из ряда последовательно проходящих стадий: подготовка бумажной смеси, разбавление ее водой, очистка от примесей, напуск смеси на сетку, формование бумажного полотна, обезвоживание на пресах, сушка бумажного полотна, каландрирование [1].

Технология производства бумаги – дорогостоящий процесс с большими затратами сырья и энергии. Наиболее энергоемким процессом является удаление воды из бумажного полотна. Оно происходит при помощи серии последовательно проходящих стадий, пока не будет достигнуто заданное значение влажности. Первоначально удаление воды происходит путем дренажа на сеточном столе и вакуумирования на отсасывающих ящиках. Когда полотно достигает влажности 75...80 % (в зависимости от вида бумаги), оно переходит в прессовую часть, где влагу удаляют при помощи механических прессов. Это наиболее экономичная секция удаления воды, поэтому на ней стараются удалить максимально возможное количество влаги. Однако достигается такое значение влажности, при котором механическое обезвоживание приводит к разрушению внутренней структуры полотна и отрицательно сказывается на качестве готовой продукции. Поэтому дальнейшее удаление воды возможно только термическим способом в сушильной части БДМ. Содержание влаги в бумаге, поступающей в сушильную часть, зависит от эффективности прессов и может составлять от 60 до 75 %. После сушки содержание влаги колеблется в пределах от 5 до 10 %.

Математическое моделирование процесса сушки бумаги является очень сложной задачей, связанной с особым процессом переноса теплоты и влаги в материале, имеющем капиллярно-пористую структуру. Сложность моделирования вызвана также чередованием разных способов теплообмена полотна бумаги с нагревающим агентом. Присутствуют стадии контактной и конвективной сушки. Еще одной особенностью, является необходимость разработки отдельных математических моделей для трёх последовательно проходящих этапов сушки: прогрева полотна, периода постоянной и падающей скорости сушки.

**Анализ предыдущих исследований.** Вопросом моделирования сушки занималось большое количество специалистов [1–3]. Наибольшее влияние на работы большинства их них оказали четыре «флагмана» данных исследований – У. Льюис, Т. Шервуд, А. Лыков, В. Красников [4–7]. Именно они создали основные уравнения кинетики тепло- и массопереноса в капиллярно-пористых коллоидных телах и именно на их исследованиях следует базировать исследования.

В работе [1] предлагается использовать методику приближенного моделирования процесса теплопередачи на сушильном цилиндре БДМ. Ее суть заключается в априори заданной структуре модели, что предполагает её единую структуру для всех этапов сушки. Однако физика процесса тепло- и массопереноса на разных стадиях различается, и обобщенную модель можно использовать только для приближенного расчета [5]. Для создания оптимальной системы автоматического управления этого недостаточно, необходимо более подробное рассмотрение всех стадий.

В работах [2, 3] построены математические модели сушки бумажного полотна в соответствии с работами А. Лыкова [5]. В отличие от работы [1], в них рассмотрен процесс сушки, разделенный на этапы, и для каждого из них построены свои модели, представленные в виде систем дифференциальных уравнений. От-