



УДК 669.181

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ МЕТАНА В
РИФОРМЕРЕ УСТАНОВКИ ПРЯМОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА
НУЛ-III****Скляр Виталий Александрович,**

кандидат технических наук, доцент,

доцент кафедры Metallургии и металловедения им. С.П. Угаровой, Старооскольский
технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический институт «МИСИС», г. Старый Оскол

e-mail: konfor1@yandex.ru

Черменев Евгений Александрович,

кандидат технических наук,

доцент кафедры Metallургии и металловедения им. С.П. Угаровой,
Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО
«Национальный исследовательский технологический институт «МИСИС», г. Старый
Оскол

e-mail: fenix-evg@yandex.ru

Карамин Андрей Васильевич,ассистент кафедры Metallургии и металловедения им. С.П. Угаровой, Старооскольский
технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический институт «МИСИС», г. Старый Оскол

e-mail: andrey31.karamin@yandex.ru

Гладкая Екатерина Александровна,аспирант кафедры Metallургии и металловедения им. С.П. Угаровой, Старооскольский
технологический институт им. А.А. Угарова (филиал) ФГАОУ ВО «Национальный
исследовательский технологический институт «МИСИС», г. Старый Оскол

e-mail: gladkaya.ea@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты моделирования процесса паровой конверсии метана в риформере установки прямого восстановления железа по модели идеального смешения газа. Разработанная модель учитывает реакцию риформинга природного газа и реакцию водяного газа. Рассчитано изменение химического состава смеси и ее температуры по длине реакционной трубы риформера. Показано, что предложенная модель хорошо описывает процессы, происходящие в реакционной трубе, расчетные значения не отличаются от производственных более чем на 4 %. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации процесса риформинга как с целью повышения экономических показателей, так и повышения количества получаемого водорода.

Ключевые слова: прямое восстановление железа, риформинг метана, реакционная труба, химические реакции, температура, моделирование.

SIMULATION OF THE STEAM REFORMING PROCESS OF METHANE IN THE REFORMER OF THE HYL-III DIRECT IRON REDUCTION PLANT

Skliar Vitalii Aleksandrovich,

Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova, Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Sary Oskol
e-mail: konfor1@yandex.ru

Chermenev Evgenii Aleksandrovich,

Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova, Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Sary Oskol
e-mail: fenix-evg@yandex.ru

Karamin Andrei Vasilevich,

assistant professor of the Department of Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova, Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Sary Oskol
e-mail: andrey31.karamin@yandex.ru

Gladkaia Ekaterina Aleksandrovna,

Postgraduate of the Department of Metallurgy and Metal Science named after S.P. Ugarova, Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Sary Oskol
e-mail: gladkaya.ea@mail.ru

ABSTRACT

The results of modeling the steam reforming of methane in the reformer of a direct iron reduction unit using the ideal gas mixing model are presented. The developed model takes into account the natural gas reforming reaction and the water-gas shift reaction. The change in the chemical composition of the mixture and its temperature along the length of the reformer's reaction tube has been calculated. It is shown that the proposed model well describes the processes occurring in the reaction tube; the calculated values do not differ from the production values by more than 4 %. The obtained results can be used to optimize the reforming process, both to improve economic performance and to increase the amount of hydrogen produced.

Keywords: direct iron reduction, methane reforming, reaction tube, chemical reactions, temperature, modeling.

Введение

Процессы прямого восстановления железа постепенно набирают все большую популярность, что связано с большей экологичностью данной технологии. А возможность использования в процессе чистого водорода позволяет снизить выбросы оксида углерода практически до нуля [1]. Поэтому в настоящий момент в РФ реализуются несколько проектов по строительству новых установок прямого восстановления железа. При этом, поскольку ранее прямое восстановление железа реализовалась только на двух предприятиях, а оборудование закупалось полностью зарубежом, то и полноценных научных исследований химических процессов, протекающих в риформере не производилось. В то же время, в текущей ситуации, когда доступ к технологиям ограничен санкциями, такие исследования представляют интерес как с точки зрения проектирования новых технологий и оборудования, так и оптимизации существующих установок.

В целом, математические модели процесса риформинга метана достаточно распространены, однако они в основном касаются процессов получения водорода для химических производств [2-4]. В то время как процесс риформинга при производстве железа методом прямого восстановления имеет определенные особенности и таких моделей практически не встречается [5].

Таким образом, разработка математической модели парового риформинга природного газа применительно к процессу прямого восстановления железа является важной и актуальной задачей.

Цель исследования – разработать математическую модель процесса риформинга природного газа для установки прямого восстановления железа и произвести ее калибровку по производственным данным.

Материалы и методы исследования

Паровой риформинг метана с целью получения синтез-газа для последующего прямого восстановления железа в шахтной печи используется в процессе НУЛ-III.

Участок по производству реформированного газа включает в себя газопаровой риформер природного газа, установку десульфурации природного газа, рекуператоры, парогенераторы и башню охлаждения реформированного газа. Технология получения реформированного газа основана на паровой конверсии природного газа в присутствии никелевого катализатора [6].

Риформер представляет собой печь, внутри которой установлены ряды труб из жаропрочного сплава НР-40, длина труб 8,9 м, внутренний диаметр 127 мм, количество труб – 180 шт.

Технологические параметры процесса следующие:

- соотношение пар/природный газ - 2,2;
- температура смеси на входе 550 °С;
- температура реформированного газа на выходе - 830 °С;
- давление 0,7 МПа [6].

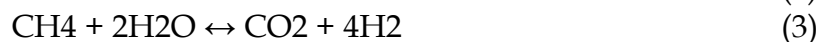
Полученный реформированный газ должен соответствовать требованиям, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Параметры реформированного газа [7]

Параметр	Химический состав, % (по объему)
H ₂	57,9
CO	13,2
CO ₂	4,62
CH ₄	2,3
N ₂	0,18

H ₂ O	21,8
Давление, кг/см ²	7
Температура, °C	830
Расход, нм ³ / час	89000

Процесс конверсии природного газа протекает по следующим основным реакциям:



Реакции (1) и (3) являются эндотермическими, а реакция (2) экзотермической. При этом часть встреченных моделей риформинга учитывают все три реакции [8], а часть только реакции (1) и (2) [9].

Полномасштабная модель процесса паровой конверсии природного газа в риформере установок прямого восстановления железа должна учитывать:

- химические реакции;
- массоперенос;
- движение в пористых средах;
- тепловой поток в пористых средах.

Модель была реализована с помощью метода конечных элементов.

Скорость реакции по уравнениям (1) и (2) вычисляли при помощи уравнений Аррениуса следующим образом:

$$K_{(1)} = 7e5 \exp\left(\frac{-93140}{R_u \cdot T}\right) \quad (4)$$

$$K_{(2)} = 1,6e5 \exp\left(\frac{-1,12e5}{R_u \cdot T}\right) \quad (5)$$

где R_u – универсальная газовая постоянная, T – температура смеси, К.

Результаты и их обсуждение

В результате расчетов получали состав реформированного газа и его температуру по длине реакционной трубы. Результаты расчетов приведены в таблице 2 и на рисунке 1. Как видим расчетные значения незначительно отличаются от промышленных данных.

В качестве примеров также приведены результаты расчетов при соотношении пар/газ = 3 (рисунок 2) и 1 (рисунок 3).

Таблица 2 - Параметры реформированного газа

Параметр	Расчет по модели	Заводские данные [7]
CH ₄	0,024	0,023
H ₂	0,5728	0,579
CO ₂	0,0451	0,0462
H ₂ O	0,2252	0,2180
CO	0,1334	0,1320
Температура	829	830

Как видим, изменение исходного соотношения пар/газ оказывает существенное влияние и на конечный состав газа. При этом с повышением исходного соотношения пар/газ с 2,2 до 3 повышается и отношение H₂/CO в готовом реформированном газе с 4,3 до 5,0. В то время снижение исходного соотношения пар/газ до 1 снижает отношение

H_2/CO в готовом реформированном газе до 3,4. Таким образом с целью повышения содержания H_2 в восстановительных газах можно повышать соотношение пар/газ, однако это приведет к дополнительным затратам энергии на производство пара.

Распределение температуры смеси по длине реакционной трубы при различных соотношениях пар/газ показано на рисунке 4.

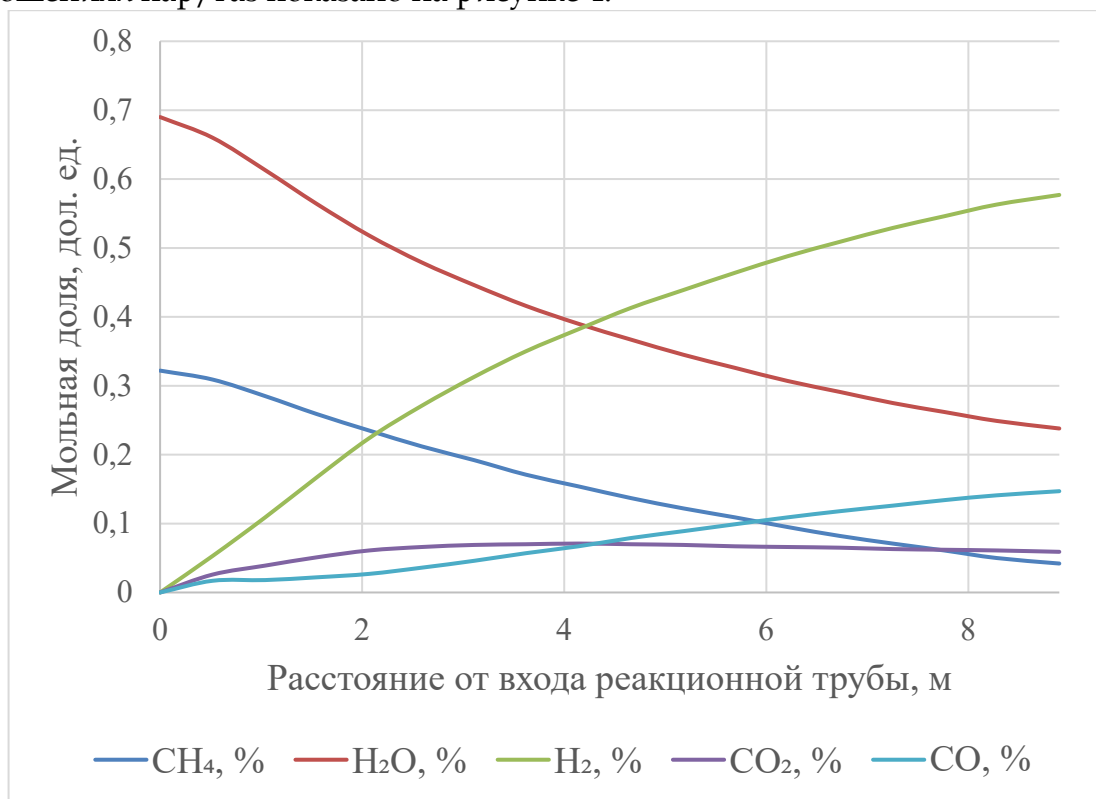


Рисунок 1 – Объемные доли компонентов по длине реакционной трубы, соотношение пар/газ = 2,2

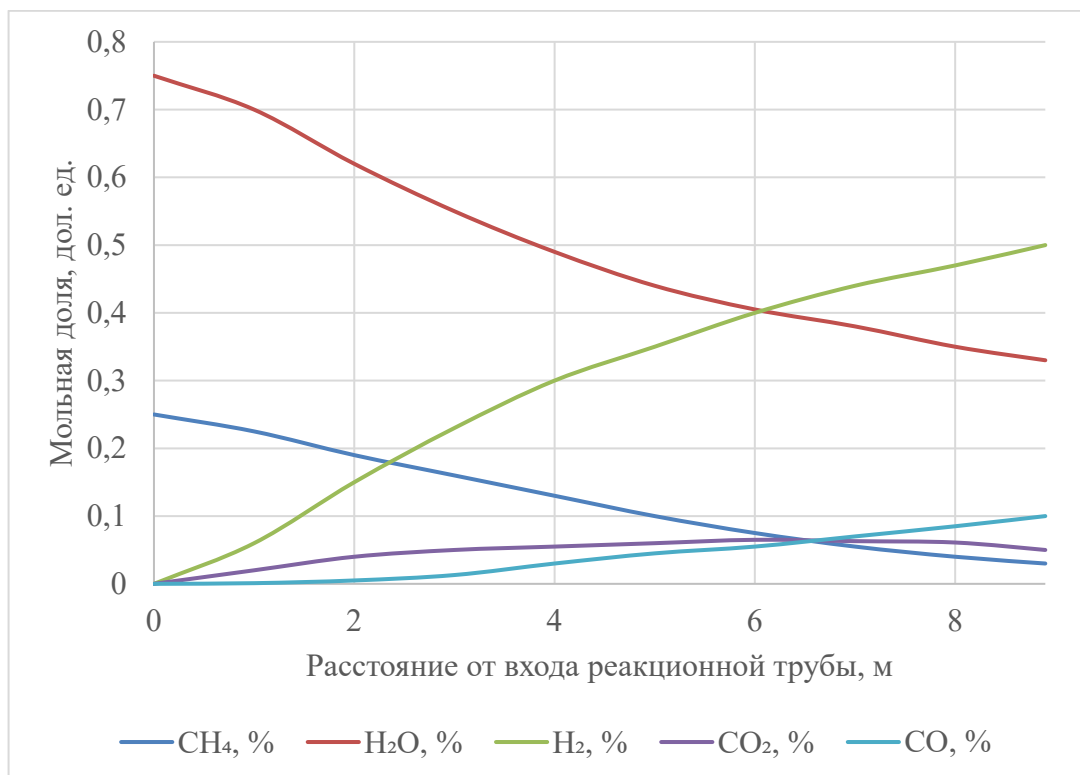


Рисунок 2 – Объемные доли компонентов и температура по длине реакционной трубы, соотношение пар/газ = 3

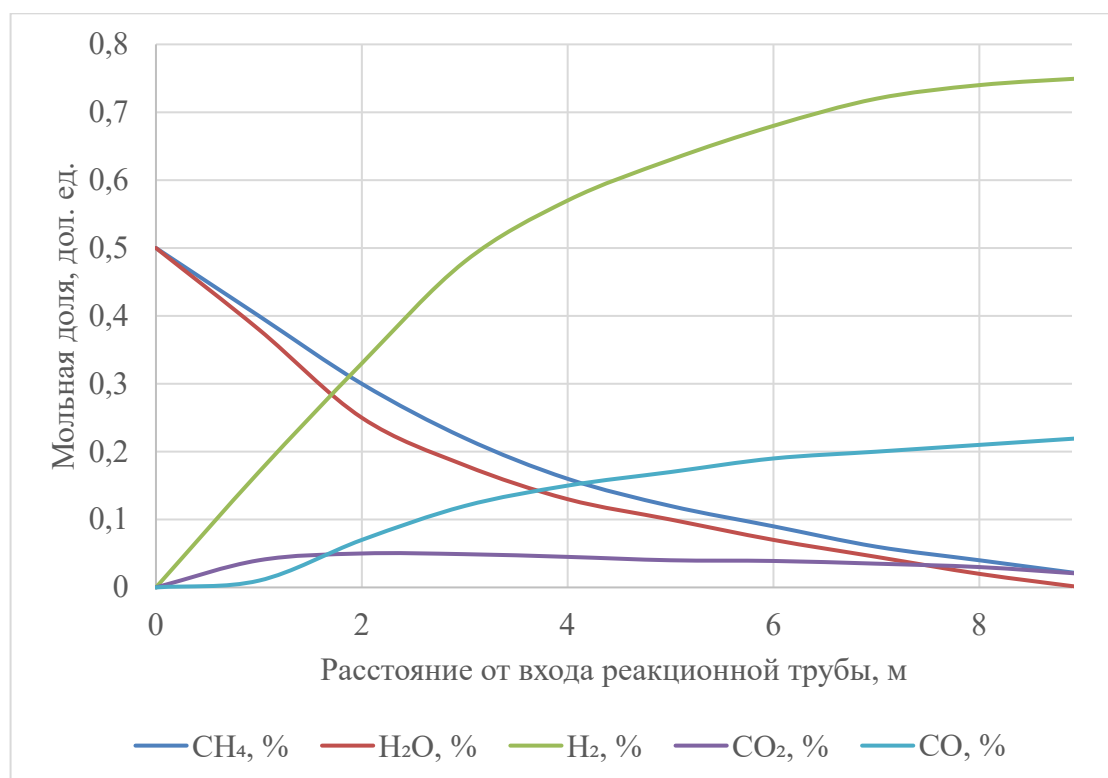


Рисунок 3 – Объемные доли компонентов и температура по длине реакционной трубы, соотношение пар/газ = 1

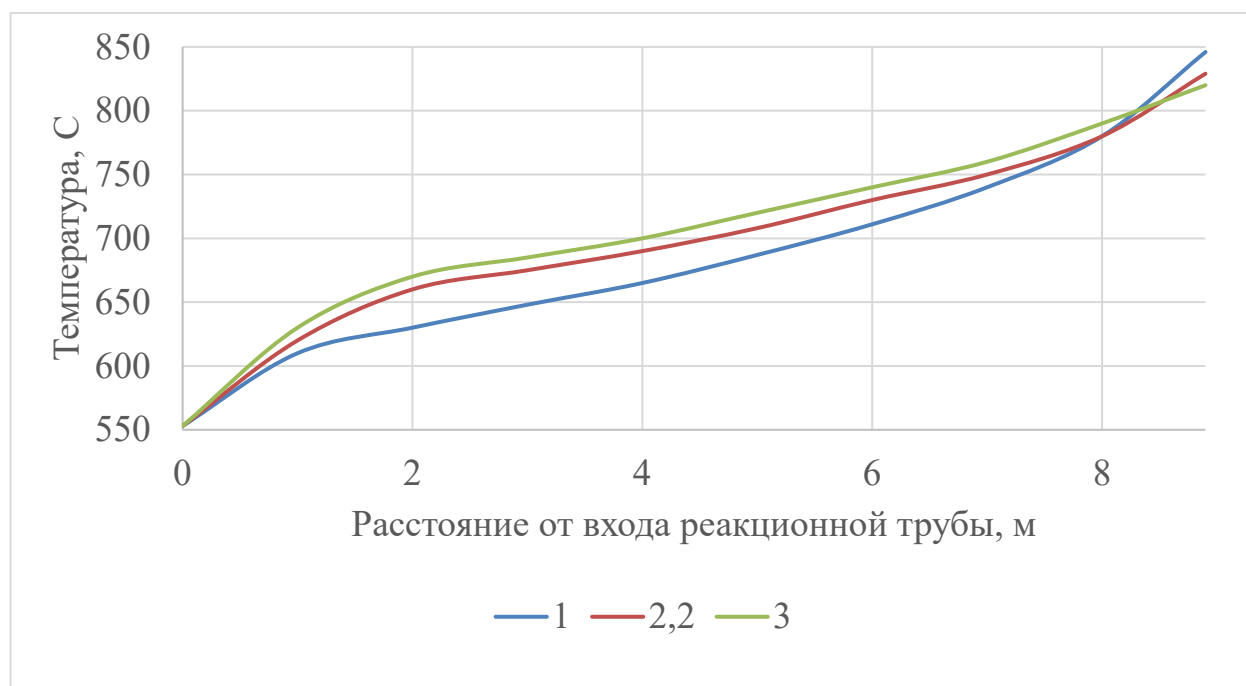


Рисунок 4 – Распределение температуры смеси по длине реакционной трубы при различных соотношениях пар/газ

Видно, что с повышением соотношения пар/газ температура смеси практически по всей длине трубы повышается, однако конечная температура смеси наоборот становится ниже, что связано с влиянием экзотермической реакции (2).

Выводы. Выполненный анализ источников показал, что большинство моделей для расчета процесса риформинга природного газа касается установок промышленного получения водорода в нефтехимии, моделей риформера для установок прямого восстановления железа не обнаружено. Разработана математическая модель процессов,

происходящих в реакционной трубе реформера при производстве реформированного газа за счет паровой конверсий природного газа по модели идеального смешения. Полученные результаты совпадают с имеющимися промышленными данными, отклонение составляет не более 4 %.

Список литературы:

1. Информационно технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Добыча и обогащение железных руд : ИТС 25 2023 / Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии ; утв. приказом Росстандарта от 22 ноября 2023 г. № 2439. Москва : Бюро НДТ, 2023. Введ. с 01.01.2024.
2. Haghi S.B., Salehi G., Azad M.T., Nichkoohi A.L. Трехмерное гидродинамическое моделирование и оптимизация цилиндрического реактора с пористым слоем для получения водорода паровым риформингом метана // Нефтехимия. 2020. Т. 60, № 6. С. 793–801.
3. Mokheimer E.M.A, Hussain M.I., Ahmed S., Habib M.A., Al-Qutub A.A. On the modeling of steam methane reforming // Journal of Energy Resources Technology. 2015. Vol. 137, № 1. P. 012001.
4. Алфаяд А.Г.Х., Валиев Д.З., Кемалов Р.А., Кемалов А.Ф. Моделирование установки парового риформинга метана с выделением водорода : учебно-методическое пособие. Казань : Казанский федеральный университет, 2023. - 59 с.
5. Benrabha M., Alhaleeb M., Salim A., Waly B., Aldeen S., Eshmila O., Salah O. Simulation and Validation of the MIDREX Reformer Process using Aspen Plus and Experimental Data // The First Scientific Conference for Undergraduate and Postgraduate Students, Alasmara Islamic University. 2024. Vol. 6. P. 42-35.
6. Тимофеева А.С., Никитченко Т.В., Тимофеев Е.С., Федина В.В. Физико-химические основы реформинга газов : учебное пособие. Старый Оскол : ТНТ, 2021. - 156 с.
7. ТИ 00186803-6.9-12-00. Технологическая инструкция. Производство реформированного газа. Губкин, 2000. - 104 с.
8. Quirino P.P.S., Amaral A., Pontes K.V., Rossi F., Manenti F. Modeling and Simulation of an Industrial Top-Fired Methane Steam Reforming Unit // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. Vol. 59, № 24. P. 11250–11264.
9. Ajbar A., Alhumaizi K., Soliman M. Modeling and simulations of a reformer used in direct reduction of iron // Korean Journal of Chemical Engineering. 2011. Vol. 28, № 12. P. 2242–2249.

References:

1. Information and technical reference guide on best available technologies. Mining and beneficiation of iron ores: ITS 25 2023 / Federal Agency for Technical Regulation and Metrology; approved by Order of Rosstandart dated November 22, 2023, No. 2439. Moscow: Bureau of Best Available Technologies, 2023. Effective from 01.01.2024.
2. Haghi S.B., Salehi G., Azad M.T., Nichkoohi A.L. Three-dimensional hydrodynamic modeling and optimization of a cylindrical reactor with a porous layer for hydrogen production by steam reforming of methane // Neftekhimiya. 2020. Vol. 60, No. 6. P. 793–801.

3. Mokheimer E.M.A, Hussain M.I., Ahmed S., Habib M.A., Al-Qutub A.A. On the modeling of steam methane reforming // Journal of Energy Resources Technology. 2015. Vol. 137, № 1. P. 012001.
4. Alfayad A.G.H., Valiev D.Z., Kemalov R.A., Kemalov A.F. Modeling of a steam reforming unit for methane with hydrogen recovery: a teaching aid. Kazan: Kazan Federal University, 2023. - 59 p.
5. Benrabha M., Alhaleeb M., Salim A., Waly B., Aldeen S., Eshmila O., Salah O. Simulation and Validation of the MIDREX Reformer Process using Aspen Plus and Experimental Data // The First Scientific Conference for Undergraduate and Postgraduate Students, Alasmara Islamic University. 2024. Vol. 6. P. 42-35.
6. Timofeeva A.S., Nikitchenko T.V., Timofeev E.S., Fedina V.V. Physical and Chemical Fundamentals of Gas Reforming: a textbook. Stary Oskol: TNT, 2021. - 156 p.
7. TI 00186803-6.9-12-00. Technological Instruction. Production of Reformed Gas. Gubkin, 2000. - 104 p.
8. Quirino P.P.S., Amaral A., Pontes K.V., Rossi F., Manenti F. Modeling and Simulation of an Industrial Top-Fired Methane Steam Reforming Unit // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2020. Vol. 59, № 24. P. 11250-11264.
9. Ajbar A., Alhumaizi K., Soliman M. Modeling and simulations of a reformer used in direct reduction of iron // Korean Journal of Chemical Engineering. 2011. Vol. 28, № 12. P. 2242-2249.