ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, *2024*, *том 43*, *№ 8*, *с. 70–77*

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 661.961

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕЖИМОВ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА ПРИ ПИРОЛИЗЕ АММИАКА В РЕАКТОРЕ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ С ПОДВИЖНЫМ СЛОЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

© 2024 г. Е. А. Салганский[1]*, М. В. Салганская[1], И. В. Седов[1]

[1]ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук, Черноголовка, Россия

**E-mail: sea@icp.ac.ru*

Поступила в редакцию 10.01.2024
После доработки 04.02.2024
Принята в печать 20.02.2024

Предложено использовать процесс пиролиза аммиака в реакторе фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя с целью получения водорода. Процесс может быть реализован в реакторах с рекуперацией энергии при раздельной подаче реагентов (в том числе в реакторах типа Swiss Roll и др.). Рассчитан массово-энергетический баланс процесса. Анализ продуктов пиролиза проводился при условии термодинамического равновесия с варьированием температуры (300–1100 K) и давления (1–10 бар). Показано, что при атмосферном давлении пиролиз аммиака заканчивается до температуры 620 K. Повышение давления в системе приводило к небольшому увеличению температуры полного термического разложения аммиака. Доля сжигаемого водорода, необходимого для покрытия энергетических затрат на нагрев и пиролиз исходного аммиака в случае адиабатического реактора, составила 0.13. Из одного моля аммиака можно получить 1.31 моля водорода.

Ключевые слова: аммиак, конверсия, рекуперация тепла, водород, термодинамика.

DOI: 10.31857/S0207401X24080088

ВВЕДЕНИЕ

Принятое в 2015 г. Парижское соглашение направлено на снижение выбросов парниковых газов для борьбы с изменением климата. Наличие парниковых газов в атмосфере приводит к глобальному потеплению, что влечет за собой повышение уровня мирового океана, а также изменение погодных условий. Изменение климата затрагивает все страны и влияет на мировую экономику и уровень жизни людей [1–3].

Основные способы снижения антропогенных выбросов парниковых газов – использование возобновляемых источников энергии и переход на низкоуглеродное топливо [4]. В настоящее время аммиак рассматривается в качестве безуглеродного топлива и как носитель водорода [5, 6]. В мире налажено широкое производство аммиака для различных целей [7, 8]. Как носитель водорода аммиак удобен в транспортировке и хранении, также он удовлетворяет требованиям пожарной безопасности. Аммиак может быть использован непосредственно в качестве топлива в различных энергетических устройствах [9]. Однако помимо упомянутых достоинств аммиак имеет и недостатки. По сравнению с углеводородными топливами у аммиака – низкая скорость горения [10, 11], узкие концентрационные пределы воспламенения [12] и высокая тепловая мощность зажигания [13]. При горении аммиака в продуктах сгорания отсутствуют оксиды углерода, но возможно образование токсических оксидов азота. Содержание последних регламентируется законодательством РФ, причем требования постоянно ужесточаются. Российский норматив удельных выбросов загрязняющих веществ по ГОСТ Р 50831-95 на содержание оксидов азота (в пересчете на диоксид азота) в дымовых газах для газовых котельных установок составляет 125 мг/куб. м.

Проводятся интенсивные исследования параметров горения аммиака. Изучаются механизмы горения, скорости различных стадий процесса [14]. Исследуются закономерности горения смесей аммиака с различными топливами: метаном [15], водородом [16], диэтиловым эфиром [17], этанолом [18], биомассой [19] и др. Добавление к аммиаку традиционных видов топлива позволяет

улучшить характеристики горения, однако приводит к дополнительным выбросам оксидов углерода.

Чтобы использовать аммиак в качестве носителя водорода, требуется выделить водород путем разложения аммиака. Известны работы по горению аммиака с предварительным пиролизом [20–22], протекающим с выделением водорода, что значительно улучшает характеристики горения. Так, в работе [23] показано, что предварительный пиролиз аммиака с конверсией в 10% значительно улучшает стабильность горения получаемой смеси в двигателе внутреннего сгорания.

В настоящей работе предложено использовать процесс пиролиза аммиака в реакторе фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя с целью получения водорода. Процесс может быть реализован в реакторах с рекуперацией энергии при раздельной подаче реагентов, в том числе в реакторах типа Swiss Roll и др. [24–26]. Аммиак и окислитель (кислород или воздух) подаются в реактор раздельно. За счет движения твердого теплоносителя происходит нагрев аммиака и разложение его на водород и азот. Часть водорода сгорает в зоне горения для поддержания процесса. Для обоснования и оптимизации предложенного способа получения водорода необходимо провести моделирование указанного процесса. Цель работы – термодинамическая оценка оптимальных условий получения водорода при пиролизе аммиака в реакторе фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Термодинамический анализ химических систем широко применяется в научных исследованиях [27, 28]. Процесс установления фазового и химического равновесия в каждой системе является необратимым и характеризуется увеличением энтропии в соответствии со вторым законом термодинамики. Таким образом, для вычисления равновесных параметров изолированных многокомпонентных реагирующих систем необходимо определить максимум энтропии такой системы. Расчет термодинамического равновесия также можно осуществить путем поиска минимума свободной энергии Гиббса системы [20, 29].

Для определения температурных режимов пиролиза аммиака и состава равновесных продуктов проведен термодинамический анализ с помощью программы расчета высокотемпературных термохимических равновесий TERRA [27] с варьированием температуры (300–1100 K) и давления (1–10 бар). Такие значения параметров характерны для процессов горения и пиролиза. Известно, что скорость химической реакции сильно зависит от температуры, и при низких значениях температуры термодинамическое равновесие устанавливается довольно долго [30, 31]. Чтобы оценить время достижения термодинамического равновесия, необходимо провести расчеты с учетом скоростей химических реакций [32]. Для оценки эффективности получения водорода в процессе пиролиза аммиака рассчитывали долю сжигаемого водорода, необходимого для покрытия энергетических затрат на нагрев и пиролиз исходного аммиака.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена схема реактора фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя при раздельной подаче реагентов [33]. Реактор заполнен твердыми частицами теплоносителя. Снизу в реактор поступает аммиак, окислитель (кислород) подается в центральную часть реактора. Зона горения стабилизируется в центре реактора напротив ввода окислителя. Высокотемпературные продукты горения фильтруются через теплоноситель вверх по реактору. За счет межфазного теплообмена происходит прогрев частиц теплоносителя. Газообразные продукты выводятся через верхний торец реактора. В реакторе осуществляется выгрузка теплоносителя через нижний торец. При этом происходит перемещение прогретых частиц теплоносителя из верхней части реактора в нижнюю. Аммиак фильтруется через прогретый теплоноситель, вследствие чего его температура повышается. Таким образом, происходит рекуперация тепла от продуктов горения к исходным реагентам [34]. Такой процесс приводит к температурам горения смеси выше адиабатической [35, 36]. При высокой температуре теплоносителя за счет теплообмена процесс пиролиза аммиака может проходить по следующей реакции:

$$NH_3 \rightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2.$$

Продукты пиролиза аммиака поступают в центр реактора, где, смешиваясь с окислителем,

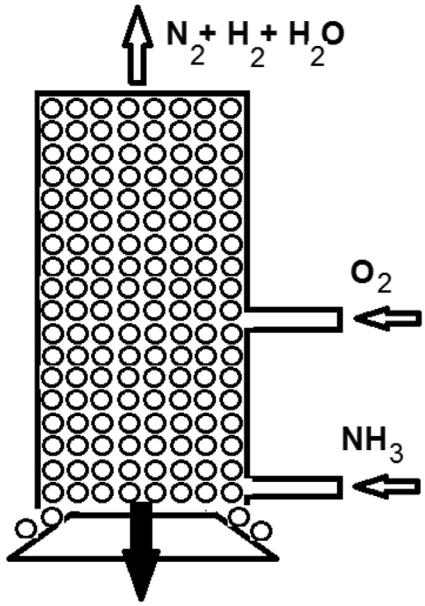

Рис. 1. Схема реактора фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя при раздельной подаче реагентов.

часть водорода сгорает с выделением тепла для поддержания процесса пиролиза:

$$0.5N_2 + 1.5H_2 + yO_2 \rightarrow$$
$$\rightarrow 0.5N_2 + (1.5 - 4y)H_2 + 2yH_2O.$$

Таким образом, реализуется процесс пиролиза аммиака с получением водорода.

Для оценки температурных режимов пиролиза аммиака проведены термодинамические расчеты. На рис. 2 представлены температурные зависимости объемного содержания газообразных продуктов пиролиза аммиака при различных давлениях (1–10 бар). При атмосферном давлении пиролиз аммиака практически заканчивается (содержание аммиака в продуктах менее 1 об.%) до температуры 620 K (рис. 2*а*). Был определен равновесный состав продуктов – водород (75 об.%) и азот (25 об.%). Увеличение давления до 5 бар приводит к повышению температуры завершения пиролиза аммиака до 740 K (рис. 2*б*). Равновесный состав продуктов пиролиза аммиака не меняется с ростом давления. Дальнейшее увеличение давления до 10 бар приводит к повышению температуры завершения пиролиза аммиака до значения 800 K (рис. 2*в*).

На рис. 2 представлены кривые, характеризующие состав газообразных продуктов пиролиза аммиака в условиях термодинамического равновесия. Однако при низких значениях температуры

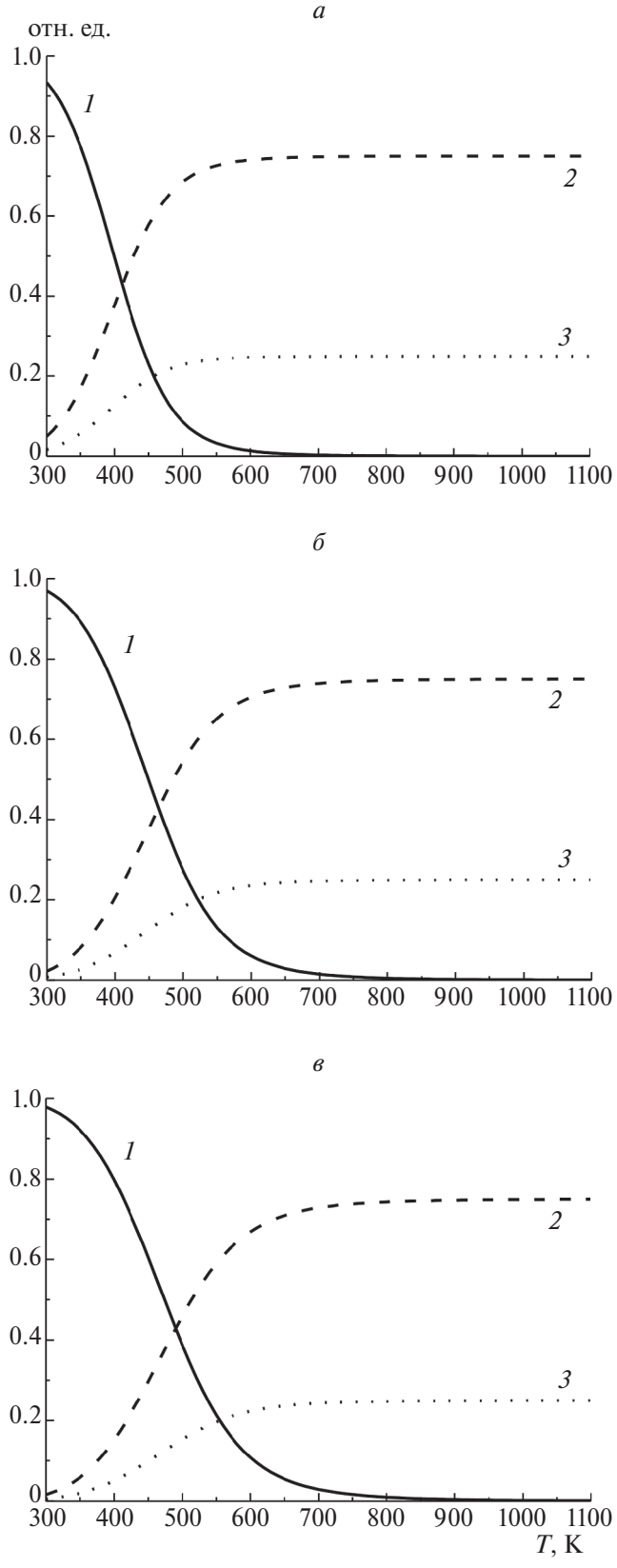

Рис. 2. Зависимости объемного содержания газообразных продуктов пиролиза аммиака (*1* – NH_3, *2* – H_2, *3* – N_2) от температуры при различных давлениях: а – 1, б – 5, в – 10 бар.

термодинамическое равновесие может устанавливаться очень долго. Для ускорения реакции можно использовать катализаторы, если нанести их на теплоноситель (или заменить теплоноситель на катализатор) [37]. Как правило, это железные или никелевые катализаторы.

Проведем оценку доли водорода, который необходимо сжечь в процессе, представленном на рис. 1, в расчете на 1 моль аммиака. Пиролиз аммиака проходит по следующей реакции:

$$NH_3 \rightarrow 0.5N_2 + 1.5H_2.$$

Согласно закону Гесса для проведения этой реакции в стандартных условиях необходимо затратить 46.2 кДж на моль аммиака. Из одного моля аммиака получится полтора моля водорода. Часть этого водорода будет окисляться в зоне горения с выделением тепла на проведение процесса. Окисление водорода проходит согласно реакции:

$$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O(г).$$

При окислении одного моля водорода выделится 241.8 кДж тепла. Для покрытия энергетических затрат на пиролиз одного моля аммиака необходимо окислить (46.2 кДж/241.8 кДж) 0.19 моль водорода. Следовательно, доля сжигаемого водорода, необходимого для покрытия энергетических затрат на нагрев и пиролиз одного моля аммиака составляет (0.19 моль/1.5 моль) 0.13. Из одного моля аммиака можно получить 1.31 моля водорода. Таким образом, выход водорода при пиролизе аммиака в адиабатическом реакторе фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя составит 87%.

На рис. 3 представлена зависимость температуры полного пиролиза аммиака от давления. Под температурой полного пиролиза аммиака подразумевается температура, при которой содержание аммиака в продуктах составляет менее 1% объемного. Видно, что при увеличении давления в системе с 1 до 10 бар температура полного пиролиза аммиака монотонно увеличивается с 620 до 800 K. С увеличением давления равновесие смещается в сторону исходного реагента (аммиака), поэтому происходит увеличение температуры. Также можно отметить, что скорость подъема температуры пиролиза замедляется с ростом давления. Увеличение давления повышает температуру полного пиролиза аммиака, но также приводит к кратному росту производительности установки.

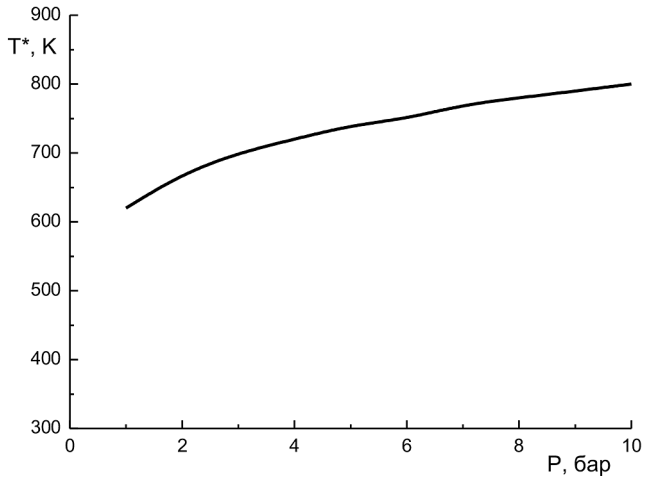

Рис. 3. Зависимость температуры полного пиролиза аммиака (T*) от давления (P).

Полученные результаты представляют собой «оценку сверху». В промышленных реакторах теплопотери неизбежны, что приведет к снижению эффективности процесса. Однако, можно надеяться, что снижение эффективности будет небольшим, вследствие низких общих потерь современных реакторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен процесс пиролиза аммиака в реакторе фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя с целью получения водорода. Процесс может быть реализован в реакторах с рекуперацией энергии при раздельной подаче реагентов. Проведена термодинамическая оценка оптимальных условий получения водорода указанным способом. Рассчитан массово-энергетический баланс процесса. Анализ продуктов пиролиза проводился при условии термодинамического равновесия с варьированием температуры и давления. Давление в системе варьировалось от 1 до 10 бар. Рассматривался температурный интервал от 300 до 1100 K. Показано, что при атмосферном давлении пиролиз аммиака практически заканчивается (содержание аммиака в продуктах менее 1% об.) до температуры 620 K. Равновесные продукты состоят из водорода (75% об.) и азота (25% об.). При увеличении давления в системе от 1 до 10 бар температура полного пиролиза аммиака монотонно увеличивается с 620 до 800 K. Однако при низких значениях температуры термодинамическое равновесие может устанавливаться очень долго. Для ускорения реакции можно ис-

пользовать катализаторы, путем нанесения их на теплоноситель (или замены теплоносителя на катализатор).

Показано, что доля сжигаемого водорода, необходимого для покрытия энергетических затрат на нагрев и пиролиз одного моля аммиака составляет 0.13. Из одного моля аммиака можно получить 1.31 моля водорода. Таким образом, выход водорода при пиролизе аммиака в адиабатическом реакторе фильтрационного горения с подвижным слоем теплоносителя составляет 87%.

Исследование выполнено в рамках Государственного задания №FFSG-2024-0016. Номер государственной регистрации И124011100153-5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Romanello M., Napoli C., Green C., et al.* // The Lancet. 2023. V. 402. N 10419. P. 2346. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01859-7
2. *Крауклит Г.В., Агаева К.С.* // Sciences of Europe. 2023. N 110. P. 77. https://doi.org/10.5281/zenodo.7618453
3. *Mohammadi M., Jafari H., Etemadi M., et al.* // Disaster medicine and public health preparedness. 2023. V. 17. P. 558. https://doi.org/10.1017/dmp.2023.225
4. *Lobus N.V., Knyazeva M.A., Popova A.F., et al.* // C-Journal of Carbon. 2023. V. 9. N 4. Article 120. https://doi.org/10.3390/c9040120
5. *Lianwei K., Weiguo P., Jaikai Z., et al.* // Fuel. 2023. V. 332. Article 126150. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126150
6. *Tao C., Dan Z., Ephraim G.* // Chem. Eng. J. 2023. V. 458. Article 141391. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141391
7. *Максимов Ю.В., Имшенник В.К., Новичихин С.В. и др.* // Хим. физика. 2023. Т. 42. № 5. С. 75. https://doi.org/10.31857/S0207401X23050084
8. *Юнусов С.М., Калюжная Е.С., Мороз Б.Л. и др.* // Изв. АН. Сер. хим. 2011. № 9. С. 1811.
9. *Nithya S., Chinnathambi A., Ali Alharbi S., et al.* // Fuel. 2024. V. 361. Article 130628. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130628
10. *Заказнов В.Ф., Куршева Л.А., Федина З.И.* // ФГВ. 1978. Т. 14. № 6. С. 22.
11. *Lhuillier C., Brequigny P., Lamoureux N., et al.* // Fuel. 2020. V. 263. Article 116653. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116653
12. *Калинчак В.В., Черненко А.С., Калугин В.В. и др.* // Хим. физика. 2016. Т. 35. № 2. С. 61. https://doi.org/10.7868/S0207401X16020060
13. *Tang Y., Xie D., Shi B. et al.* // Fuel. 2022. V. 313. Article 122674. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122674
14. *Valera-Medina A., Vigueras-Zuniga M.O., Shi H. et al.* // Int. J. Hydrog. Energy. 2024. V. 49. P. 1597. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.241
15. *Kovaleva M., Hayakawa A., Colson S. et al.* // Fuel Commun. 2022. V. 10. Article 100054. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100054
16. *Alfazazi A., Es-sebbar E., Zhang X. et al.* // Appl. Energy Combust. Sci. 2022. V. 12. Article 100099. https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100099
17. *Shrestha K.P., Giri B.R., Elbaz A.M. et al.* // Fuel Commun. 2022. V. 10. Article 100051. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100051
18. *Ronan P., Pierre B., Christine M.R. et al.* // Fuel Commun. 2022. V. 10. Article 100052. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100052
19. *Cardoso J.S., Silva V., Chavando J.A.M. et al.* // Fuel Commun. 2022. V. 10. Article 100055. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100055
20. *Mei B., Zhang J., Shi X. et al.* // Combust. Flame. 2021. V. 231. Article 111472. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111472
21. *Ryu K., Zacharakis-Jutz G.E., Kong S.C.* // Int. J. Hydrog. Energy. 2014. V. 39. N 5. P. 2390. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.11.098
22. *Gill S.S., Chatha G.S., Tsolakis A. et al.* // Int. J. Hydrog. Energy. 2012. V. 37. N 7. P. 6074. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.137
23. *Mercier A., Mounaïm-Rousselle C., Brequigny P., et al.* // Fuel Commun. 2022. V. 11. Article 100058. https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100058
24. *Rabinovich O.S., Malinouski A.I., Kislov V.M., et al.* // Combust. Theor. Model. 2016. V. 20. N. 5. P. 877. https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1190034
25. *Jiaxin L., Guangyao Y., Shixuan W. et al.* // Fuel. 2023. V. 349. Article 128740. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128740
26. *Mujeebu M.A.* // Appl. Energy. 2016. V. 173. P. 210. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.018
27. *Трусов Б.Г.* // XIV Междунар. конф. по хим. термодинамике. Спб: НИИХ СПбГУ, 2002. С. 483.
28. *Петров В.В., Варзарев Ю.Н., Старникова А.П., Абдуллин Х.А.* // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 2. С. 37. https://doi.org/10.31857/S0207401X20020089
29. *Tabrizi F.F., Mousavi S.A.H.S., Atashi H.* // Energy Convers. Manag. 2015. V. 103. P. 1065. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.005
30. *Tereza A.M., Medvedev S.P., Smirnov V.N.* // Acta Astronaut. 2020. V. 176. P. 653. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.045
31. *Тереза А.М., Андержанов Э.К.* // Хим. физика. 2019. Т. 38. № 8. С. 58. https://doi.org/10.1134/S0207401X19080120
32. *Tereza A.M., Kozlov P.V., Gerasimov G.Y. et al.* // Acta Astronaut. 2023. V. 204. P. 705. https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001
33. *Salgansky E.A., Zaichenko A.Yu., Podlesniy D.N. et al.* // Fuel. 2017. V. 210. P. 491. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.103

34 *Toledo M., Arriagada A., Ripoll N. et al.* // Renewable Sustainable Energy Rev. 2023. V. 177. Article 113213. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113213

35. *Салганская М.В., Глазов С.В., Салганский Е.А. и др.* // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 1. С. 27.

36. *Цветков М.В., Салганский Е.А.* // ЖПХ. 2018. Т. 91. N. 7. С. 988. https://doi.org/10.1134/S0044461818070095

37. *Гришин М.В., Гатин А.К., Слуцкий В.Г. и др.* // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 9. С. 74. https://doi.org/10.1134/S0207401X18090066

THERMODYNAMIC EVALUATION OF HYDROGEN PRODUCTION MODES DURING PYROLYSIS OF AMMONIA IN A FILTRATION COMBUSTION MOVING BED REACTOR

E. A. Salgansky*, M. V. Salganskaya, I. V. Sedov

FRC Problems of Chemical Physics and Medicinal Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Chernogolovka, Russia
**E-mail: sea@icp.ac.ru*

A new process has been proposed for pyrolysis of ammonia in a filtration combustion moving bed reactor to produce hydrogen. The process can be implemented in reactors with energy recovery with separate supply of reagents (including swiss-roll reactor, etc.). The mass-energy balance of the process was calculated. The analysis of pyrolysis products was carried out under the condition of thermodynamic equilibrium with varying temperature and pressure. The system pressure varied from 1 to 10 bar. The temperature range from 300 to 1100 K was considered. It has been shown that ammonia pyrolysis ends at a temperature of 620 K at atmospheric pressure. An increase in pressure in the system led to a slight increase in the temperature of ammonia pyrolysis. The portion of hydrogen that needs to be burned to cover the energy for heating and pyrolysis of the initial ammonia in the case of an adiabatic reactor was 0.13. From one mole of ammonia it is possible to obtain 1.31 moles of hydrogen.

Keywords: ammonia, conversion, heat recovery, hydrogen, thermodynamics

REFERENCES

1. M. Romanello, C. Napoli, C. Green et al., The Lancet. **402**, 10419 (2023). https://doi.org/10.1016/S0140-6736(23)01859-7
2. G. Krauklit, and K. Aghayeva, Sciences of Europe. **110**, 77 (2023). https://doi.org/10.5281/zenodo.7618453
3. M. Mohammadi, H. Jafari, M. Etemadi, et al., Disaster medicine and public health preparedness. **17**, 558 (2023). https://doi.org/10.1017/dmp.2023.225
4. N.V. Lobus, M.A. Knyazeva, A.F. Popova, et al., C-Journal of Carbon. **9** (4), 120 (2023). https://doi.org/10.3390/c9040120
5. K. Lianwei, P. Weiguo, Z. Jaikai, et al., Fuel. **332**, 126150 (2023). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126150
6. C. Tao, Z. Dan, and G. Ephraim, Chem. Eng. J. **458**, 141391 (2023). https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141391
7. Yu.V. Maksimov, V.K. Imshennik, S.V. Novichikhin, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **17**, 620 (2023). https://doi.org/10.1134/S1990793123030089
8. S.M. Yunusov, E.S. Kalyuzhnaya, V.B. Shura, et al., Russ. Chem. **Bull**. 60 (9), 1842 (2011). https://doi.org/10.1007/s11172-011-0278-5
9. S. Nithya, A. Chinnathambi, S. Ali Alharbi, et al., Fuel. **361**, 130628 (2024). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130628
10. V.F. Zakaznov, L.A. Kursheva, and Z.I. Fedina, Combust. Explos. Shock Waves. **14** (6), 710 (1978). https://doi.org/10.1007/BF00786097
11. C. Lhuillier, P. Brequigny, N. Lamoureux, et al., Fuel. **263**, 116653 (2020). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116653
12. V.V. Kalinchak, A.S. Chernenko, V.V. Kulagin, et al., Khimicheskaya fizika. **35** (2), 61 (2016). https://doi.org/10.7868/S0207401X16020060
13. Y. Tang, D. Xie, B. Shi, et al., Fuel. **313**, 122674 (2022). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122674
14. A. Valera-Medina, M.O. Vigueras-Zuniga, H. Shi, et al., Int. J. Hydrog. Energy. **49**, 1597 (2024). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.10.241
15. M. Kovaleva, A. Hayakawa, S. Colson, et al., Fuel Commun. **10**, 100054 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100054
16. A. Alfazazi, E. Es-sebbar, X. Zhang, et al., Appl. Energy Combust. Sci. **12**, 100099 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jaecs.2022.100099
17. K.P. Shrestha, B.R. Giri, A.M. Elbaz, et al., Fuel Commun. **10**, 100051 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100051
18. P. Ronan, B. Pierre, M.R. Christine, et al., Fuel Commun. **10**, 100052 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100052
19. J.S. Cardoso, V. Silva, J.A.M. Chavando, et al., Fuel Commun. **10**, 100055 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100055
20. B. Mei, J. Zhang, X. Shi, et al., Combust. Flame. **231**, 111472 (2021). https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111472
21. K. Ryu, G.E. Zacharakis-Jutz, and S.C. Kong, Int. J. Hydrog. Energy. **39** (5), 2390 (2014). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.11.098
22. S.S. Gill, G.S. Chatha, A. Tsolakis, et al., Int. J. Hydrog. Energy. **37** (7), 6074 (2012). https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.137
23. A. Mercier, C. Mounaïm-Rousselle, P. Brequigny, et al., Fuel Commun. **11**, 100058 (2022). https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2022.100058

24. O.S. Rabinovich, A.I. Malinouski, V.M. Kislov, et al., Combust. Theor. Model. **20** (5), 877 (2016). https://doi.org/10.1080/13647830.2016.1190034
25. L. Jiaxin, Y. Guangyao, W. Shixuan, et al., Fuel. **349**, 128740 (2023). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128740
26. M.A. Mujeebu, Appl. Energy. **173**, 210 (2016). https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.018
27. B.G. Trusov, Proceedings of the 14th International Conference on Chemical Thermodynamics (NIIKh SPbGU, St. Petersburg). **483** (2002).
28. V.V. Petrov, Y.N. Varzarev, A.P. Starnikova, and Kh.A. Abdullin, Russ. J. Phys. Chem. B **14**, 117 (2020). https://doi.org/10.1134/S199079312001025X
29. F.F. Tabrizi, S. Mousavi, and H. Atashi, Energy Convers. Manag. **103**, 1065 (2015). https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.005
30. A.M. Tereza, S.P. Medvedev, and V.N. Smirnov, Acta Astronaut. **176**, 653 (2020). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.03.045
31. A.M. Tereza, and E.K. Anderzhanov, Russ. J. Phys. Chem. B **13**, 626 (2019). https://doi.org/10.1134/S1990793119040262
32. A.M. Tereza, P.V. Kozlov, G.Y. Gerasimov, et al., Acta Astronaut. **204**, 705 (2023). https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.11.001
33. E.A. Salgansky, A.Yu. Zaichenko, D.N. Podlesniy, et al., Fuel. **210**, 491 (2017). https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.08.103
34. M. Toledo, A. Arriagada, N. Ripoll, et al., Renewable Sustainable Energy Rev. **177**, 113213 (2023). https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113213
35. M.V. Salganskaya, S.V. Glazov, E.A. Salganskii, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **2** (1), 71 (2008). https://doi.org/10.1134/S1990793108010119
36. M.V. Tsvetkov, and E.A. Salganskii, Russ. J. Appl. Chem. **91** (7), 1129 (2018). https://doi.org/10.1134/S1070427218070108
37. M.V. Grishin, A.K. Gatin, V.G. Slutsky, et al., Russ. J. Phys. Chem. B **12**, 937 (2018). https://doi.org/ 10.1134/S1990793118050068