

УДК 661.531+66.012

О. Б. Дормешкин, А. Н. Гаврилюк, В. С. Францкевич, М. С. Мохорт, А. А. Бышик
Белорусский государственный технологический университет

**ВЛИЯНИЕ СОСТАВА И КАЛОРИЙНОСТИ ПРИРОДНОГО ГАЗА
НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОИЗВОДСТВА
СИНТЕТИЧЕСКОГО АММИАКА**

Основные технико-экономические показатели производства аммиака рассчитывают исходя из усредненных качественно-количественных данных состава природного газа. Однако состав природного газа колеблется как для различных месторождений, так и в границах одного месторождения, что неизбежно оказывает влияние на конечные показатели работы аммиачных производств и приводит к значительным погрешностям при оценке технико-экономических характеристик. В статье представлены результаты исследований, целью которых явилось изучение влияния калорийности природного газа на величину его расхода в расчете на тонну аммиака, в том числе потребляемого на технологию и отдельно на сжигание газа в качестве топлива. Итоги исследований, а также выполненные тепло-технические расчеты с учетом особенностей технологического процесса, оборудования и режимов производства аммиака цехов «Аммиак-3» и «Аммиак-4» ОАО «Гродно Азот» позволили сделать вывод о том, что с повышением доли гомологов метана в исходном природном газе его расход на производство одной тонны аммиака снижается. Это обусловлено образованием большего количества водорода на стадии конверсии и выделением большего количества теплоты в межтрубном пространстве трубчатой печи ввиду более высокой теплоты сгорания гомологов метана. Полученные результаты позволяют спрогнозировать изменение калорийности, расхода природного газа как на технологические нужды, так и на его сжигание в качестве топлива, а также основные технико-экономические показатели производства синтетического аммиака в зависимости от содержания отдельных компонентов в исходном природном газе.

Ключевые слова: природный газ, компоненты, калорийность, синтетический аммиак, технология, тепловой баланс, показатели, расход.

Для цитирования: Дормешкин О. Б., Гаврилюк А. Н., Францкевич В. С., Мохорт М. С., Бышик А. А. Влияние состава и калорийности природного газа на технико-экономические показатели производства синтетического аммиака // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геология. 2025. № 2 (295). С. 73–78.

DOI: 10.52065/2520-2669/2025-295-10.

O. B. Dormeshkin, A. I. Hauryliuk, V. S. Frantskevich, M. S. Mokhart, A. A. Byshik
Belarusian State Technological University

**INFLUENCE OF THE COMPOSITION AND CALORIFIC VALUE OF NATURAL GAS
ON THE TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS OF SYNTHETIC
AMMONIA PRODUCTION**

The main technical and economic indicators of ammonia production are calculated based on the averaged qualitative and quantitative indicators of the composition of natural gas. However, the composition of natural gas fluctuates both for different fields and within the boundaries of one field, which inevitably affects the final performance of ammonia production and leads to significant errors in the assessment of technical and economic indicators. The article presents the results of research aimed at studying the effect of the calorific value of natural gas on the value of its consumption per ton of ammonia, including the ammonia consumed for the technology and separately for gas combustion as fuel. The results of the study, as well as the performed thermal and technical calculations, taking into account the features of the technological process, equipment and modes of ammonia production at the Ammonia-3 and Ammonia-4 shops of «Grodno Azot», made it possible to conclude that with an increase in the share of methane homologues in the initial natural gas, its consumption for the production of one ton of ammonia decreases. This is due to the formation of more hydrogen at the conversion stage and the release of more heat in the annular space of the tube furnace, due to the higher calorific value of methane homologues. The results obtained make it possible to predict changes in the calorific value, consumption of natural gas both for technology and for its combustion as fuel, as well as the main technical and economic indicators of synthetic ammonia production depending on the content of individual components in the initial natural gas.

Keywords: natural gas, components, calorific value, synthetic ammonia, technology, thermal balance, indicators, consumption.

For citation: Dormeshkin O. B., Hauryliuk A. N., Frantskevich V. S., Mokhart M.S., Byshik A. A. Influence of the composition and calorific value of natural gas on the technical and economic indicators of synthetic ammonia production. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2025, no. 2 (295), pp. 73–78 (In Russian).

DOI: 10.52065/2520-2669-2025-295-10.

Введение. Основным видом сырья для получения синтетического аммиака, как известно, является природный газ, главными поставщиками которого на ОАО «Гродно Азот» выступают российские газодобывающие компании. В настоящее время на предприятии эксплуатируются два цеха по производству аммиака: «Аммиак-3» и «Аммиак-4». Способ производства основан на переработке природного газа по энерготехнологической схеме и включает следующие стадии: компримирование природного газа и воздуха; гидрирование органических серосодержащих соединений; паровую конверсию метана и его гомологов в трубчатой печи (первичный риформинг); паровоздушную конверсию остаточного метана в шахтном конвертере (вторичный риформинг); двухступенчатую конверсию оксида углерода (II); очистку газа от диоксида углерода; метанитрование; компримирование синтез-газа; синтез аммиака; выделение продукционного аммиака и его выдачу в изотермическое хранилище и потребителям [1–4].

Основные технико-экономические показатели цехов по производству аммиака рассчитывают исходя из усредненных качественно-количественных характеристик состава поступающего природного газа. Однако, как показывает практика, состав природного газа колеблется как для различных месторождений, так и в границах одного месторождения, что неизбежно оказывает влияние на конечные показатели работы аммиачных производств и приводит к значительным погрешностям при оценке технико-экономических показателей [5–9].

В связи с этим авторами в рамках договора с ОАО «Гродно Азот» выполнен комплекс исследований, целью которых явилось изучение влияния калорийности природного газа на величину его расхода в расчете на тонну аммиака, в том числе потребляемого на технологию и отдельно на сжигание газа в качестве топлива. Это в свою очередь позволит выполнить прогнозную оценку влияния изменения состава и расхода природного газа на технологический процесс и его технико-экономические показатели.

Основная часть. Необходимые технологические и теплотехнические расчеты выполнялись для реальных составов природного газа, поступающего на ОАО «Гродно Азот», по каждой из указанных выше стадий согласно методике, изложенной в работе [10]. В связи с особенностями

организации процесса получения синтетического аммиака, его технологического режима и аппаратного оформления расчеты выполнены отдельно по каждому из цехов. Компонентный состав природного газа определялся по ГОСТ 23781–87 «Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава» [11]. Установление содержания компонентов природного газа проводили для соединений, объемная доля которых превышала 0,005%, за исключением метана, его содержание рассчитывали как остаточное количество от суммы всех компонентов. Результаты анализа содержания отдельных компонентов в исходных составах природного газа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Составы природного газа

Компонентный состав	Объемная доля, об. %		
	№ 1	№ 2	№ 3
CH ₄	96,1868	95,6599	94,7770
C ₂ H ₆	2,5499	2,8303	3,1796
C ₃ H ₈	0,3360	0,5201	0,8199
C ₄ H ₁₀	0,1170	0,1540	0,2320
C ₅ H ₁₂	0,0217	0,0226	0,0333
C ₆ H ₁₄	0,0186	0,0097	0,0077
N ₂	0,5040	0,5401	0,8199
He	0,0097	0,0114	0,0114
H ₂	0,0015	0,0023	0,0023
O ₂	0,0038	0,0037	0,0050
CO ₂	0,2510	0,2460	0,1120
Всего	100,0000	100,0000	100,0000

Теплоту сгорания (Q) высшую (Q_v) и низшую (Q_n) исходных составов природного газа рассчитывали согласно источнику [12] на основании известных данных теплоты сгорания отдельных компонентов сухого природного газа при температурах 0 и 20°C и давлении 101,325 кПа (табл. 2) по следующей формуле:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i \cdot C_i,$$

где Q_i – теплота сгорания газа (высшая или низшая) i -го компонента газа; C_i – доля i -го компонента в газе.

Таблица 2

Высшая и низшая теплота сгорания компонентов сухого природного газа (при 20°C и 101 кПа) [13, 14]

Наименование компонента	Теплота сгорания			
	высшая		низшая	
	МДж/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	ккал/м ³
Метан	37,10	8860	33,41	7980
Этан	65,38	15620	59,85	14300
Пропан	93,98	22450	86,53	20670
<i>n</i> -Бутан	123,78	29550	114,27	27290
<i>i</i> -Бутан	123,25	29440	113,81	27180
Пентан	155,65	37180	144,02	34400
Гексан	174,62	41710	161,36	38540
Гептан	202,10	48270	186,87	44630
Октан	229,38	54790	212,22	50690
Нонан	257,48	61500	238,76	57030
Бензол	151,09	36090	145,05	34640
Толуол	164,24	39230	156,71	37430
Водород	11,87	2840	10,05	2400
Оксид углерода (II)	11,78	2810	11,78	2810
Сероводород	23,60	5640	21,75	5200

Результаты расчета теплоты сгорания исходных составов природного газа представлены в табл. 3.

Таблица 3

Расчетные значения теплоты сгорания исходных составов природного газа

Номер состава газа	Теплота сгорания			
	высшая		низшая	
	МДж/м ³	ккал/м ³	МДж/м ³	ккал/м ³
При 0°C				
1	40,663	9711,242	36,677	8760,298
2	40,871	9760,939	36,872	8806,816
3	41,187	9836,444	37,169	8877,768
При 20°C				
1	37,879	9046,319	34,148	8156,392
2	38,072	9092,343	34,328	8199,492
3	38,364	9162,177	34,603	8265,152

Расчет выполнен на 1000 м³ природного газа по каждой из стадий технологического процесса

получения синтетического аммиака согласно фактическим нормам технологического режима. Ввиду значительного объема расчетных работ в рамках настоящей статьи приведены сводные результаты расчетов для состава природного газа № 1 цеха «Аммиак-3» только для одной технологической стадии – паровой конверсии метана в трубчатой печи (первичный риформинг). Результаты расчетов представлены в табл. 4–6. Полный расчет по всем технологическим стадиям и цехам дан в работе [15].

Таблица 4

Количественный состав природного газа на входе в трубчатую печь

Компонент	Природный газ, м ³	Азот-водородная смесь, м ³	Смешанный газ, м ³
CH ₄	961,8683	0,0000	961,8683
C ₂ H ₆	25,4992	0,0000	25,4992
C ₃ H ₈	3,3599	0,0000	3,3599
C ₄ H ₁₀	1,1700	0,0000	1,1700
C ₅ H ₁₂	0,2170	0,0000	0,2170
C ₆ H ₁₄	0,1860	0,0000	0,1860
H ₂	0,0150	66,6000	66,6150
N ₂	5,0398	22,5000	27,5398
Инертные газы	0,1350	0,9000	1,0350
CO ₂	2,5099	0,0000	2,5099
Всего	1000,0000	90,0000	1090,0000

Таблица 5

Количество и состав газовой смеси после трубчатой печи

Компонент	Влажный газ, м ³	Сухой газ, м ³
CO ₂	352,5092	352,5092
CO	347,4374	347,4374
H ₂	2471,3976	2471,3976
CH ₄	332,3903	332,3903
N ₂	27,5398	27,5398
Инертные газы	1,0350	1,0350
H ₂ O	2476,1595	–
Всего	6008,4689	3532,3094

Таблица 6

Тепловой баланс трубчатой печи

Приход тепла	Количество		Расход тепла	Количество	
	кДж	%		кДж	%
1. С парогазовой смесью	3943623,18	13,60	1. Унос с парогазовой смесью	7644366,11	26,37
2. Образующееся при сгорании природного газа	25049664,14	86,40	2. Унос с дымовыми газами	14518407,26	50,08
			3. На протекание химических реакций	5670782,46	19,56
			4. Потери в окружающую среду	1159731,49	4,00
Всего	28993287,33	100,00	Всего	28993287,33	100,00

Таблица 7

Зависимость технологических показателей производства синтетического аммиака и расходных норм от калорийности природного газа

№ состава	Калорийность, ккал/м³		Образуется NH ₃ из1000 м³ природного газа	Расход природного газа			
	расчетная	фактическая		на сжигание в трубчатой печи, м³/т NH ₃	на получение пара, м³/т NH ₃	на технологию, м³/т NH ₃	общий расход, м³/т NH ₃
Цех «Аммиак-3»							
1	8156,392	8154	1683,0716	451,3864	78,3062	594,1518	1123,8444
2	8199,492	8193	1690,6239	448,2494	77,1124	591,4976	1116,8594
3	8265,152	8247	1702,5371	443,2830	75,3720	587,3587	1106,0137
Цех «Аммиак-4»							
1	8156,392	8154	1700,4541	417,8462	69,4155	588,0782	1075,3399
2	8199,492	8193	1708,4294	414,8658	68,2844	585,3329	1068,4831
3	8265,152	8247	1721,0003	410,1388	66,6395	581,0574	1057,8357

Аналогичные расчеты выполнены по каждой из технологических стадий для смесей № 1–3. Сводные результаты расчетов основных технологических показателей и расходных норм производства синтетического аммиака цехов «Аммиак-3», «Аммиак-4» ОАО «Гродно Азот» в зависимости от состава и калорийности исходного природного газа приведены в табл. 7.

Заключение. Результаты исследования влияния калорийности природного газа на величину его расхода и технологические показатели производства синтетического аммиака, а также выполненные тепло-технические расчеты с учетом особенностей технологического процесса, оборудования и режимов производства аммиака цехов «Аммиак-3» и «Аммиак-4» ОАО «Гродно Азот» позволили сделать вывод о том, что с повышением доли гомологов метана в исходном природном газе его расход на производство одной тонны аммиака снижается. Это обусловлено

образованием большего количества водорода на стадии конверсии и выделением большего количества тепла в межтрубном пространстве трубчатой печи ввиду более высокой теплоты сгорания гомологов метана. Полученные результаты позволяют спрогнозировать изменение калорийности, расхода природного газа как на технологические нужды, так и на его сжигание в качестве топлива, а также основные технико-экономические показатели производства синтетического аммиака в зависимости от содержания отдельных компонентов в исходном природном газе. Так, для цеха «Аммиак-3» при увеличении калорийности природного газа с 8156,392 до 8265,152 ккал/м³ его расход снижается с 1123,8444 до 1106,0137 м³/т NH₃, а для цеха «Аммиак-4» – с 1075,3399 до 1057,8357 м³/т NH₃. Среднее снижение расхода природного газа для цеха «Аммиак-3» составило 0,1636 м³/ккал, для цеха «Аммиак-4» – 0,1608 м³/ккал.

Список литературы

1. Appl M. Ammonia: principles and industrial practice. Weinheim: Wiley-VCH, 1999. 289 p.
2. Appl M. Ammonia, Methanol Hydrogen, Carbon Monoxide – Modern Production Technologies. London: CRU, 1997. P. 98–99.
3. Slack A. V., James G. J. Commercial ammonia processes, Ammonia. Part 111: Marcel Dekker. New York, 1974. P. 291–369.
4. Vancini C. A. La Sintesi dell Amoniaca. Milano: Hoepli, 1961. P. 497.
5. Hansen J. B. Ammonia – Catalysis and Manufacture. Heidelberg: Springer, 1995. P. 184.
6. Topham S. A. Catalysis, Science and Technology. Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer. Vol. 7. P. 1–50.
7. Keith J. Elkins. Commissioning of the ICI LCA Ammonia plants at Severnside, Briston, England // ICI/CFDC Technical symposium. Shanghai, 1989. P. 5.
8. The ICI gas hearted reformer (GHR) system / K. J. Elkins [et al.] // Nitrogen 91: British sulphur conference. Copenhagen, 1991. P. 10.
9. The ICI leading concept ammonia process – the first two year / P. M. Armitage [et al.] // AIChE Ammonia symposium. Los Angeles, 1991. P. 7.
10. Технология связанного азота и азотных удобрений / А. Н. Гаврилюк [и др.]. Ташкент: ТХТИ, 2019. 229 с.
11. Газы горючие природные. Хроматографический метод определения компонентного состава: ГОСТ 23781–87. М.: Изд-во стандартов, 1988. 11 с.

12. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе. ГОСТ 22667–82. М.: Изд-во стандартов, 1983. 3 с.

13. Краткий справочник физико-химических величин / Н. М. Барон [и др.], под ред. А. А. Радвеля. 5-е изд., перераб. Л.: Химия, 1967. 186 с.

14. Справочник азотчика: физико-химические свойства газов и жидкостей. Производство технологических газов. Очистка технологических газов. Синтез аммиака. 2-е изд., перераб. М.: Химия, 1986. 512 с.

15. Влияние калорийности природного газа на величину расхода природного газа: отчет о научно-исследовательской работе ХД 24-078 / О. Б. Дормешкин [и др.]. Минск, 2024. 98 с.

References

1. Appl M. Ammonia: principles and industrial practice / Weinheim, Wiley-VCH Publ., 1999. 289 p.
2. Appl M. Ammonia, Methanol Hydrogen, Carbon Monoxide – Modern Production Technologies. London, CRU Publ., 1997. P. 98–99.
3. Slack A. V., James G. J. Commercial ammonia processes. Ammonia. Part 111, Marcel Dekker. New York, 1974, pp. 291–369.
4. Vancini C. A. La Sintesi dell Amoniaca. Milano, Hoepli Publ., 1961. P. 497.
5. Hansen J. B. Ammonia – Catalysis and Manufacture. Heidelberg, Springer Publ., 1995. P. 184.
6. Topham S. A. Catalysis, Science and Technology. Verlag, Berlin – Heidelberg – New York – Tokyo, Springer Publ., vol. 7, pp. 1–50.
7. Keith J. Elkins. Commissioning of the ICI LCA Ammonia plants at Severnside. Briston, England. ICI/CFDC Technical symposium. Shanghai, 1989. P. 5.
8. Elkins K. J., Jeffrey I. C., Kitchen D., Pinto A. The ICI gas hearted reformer (GHR) system. *Nitrogen 91, British sulphur conference*. Copenhagen, 1991. P. 10.
9. Armitage P. M., Elkins K. J., Kitchen D., Pinto A. The ICI leading concept ammonia process – the first two year. *AIChE Ammonia symposium*. Los Angeles, 1991. P. 7.
10. Gavriluk A. N., Dormeshkin O. B., Erkaev A. U., Sharipova H. T. *Tekhnologiya svyazannogo azota i azotnykh udobreniy* [Technology of fixed nitrogen and nitrogen fertilizers]. Tashkent, THTI Publ., 2019. 229 p. (In Russian).
11. GOST 23781–87. Natural flammable gases. Chromatographic method for determining component composition. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1988. 11 p. (In Russian).
12. GOST 22667–82. Natural Combustible Gases. Calculation Method for Determining Heat of Combustion, Relative Density, and Wobbe Index. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1983. 3 p. (In Russian).
13. Baron N. M., Ponomareva A. M., Ravdel A. A., Timoveeva Z. N. *Kratkiy spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Brief reference book of physical and chemical quantities]. Leningrad, Khimiya Publ., 1967. 186 p. (In Russian).
14. *Spravochnik azotchika: fiziko-khimicheskiye svoystva gazov i zhidkostey. Proizvodstvo tekhnologicheskikh gazov. Ochistka tekhnologicheskikh gazov. Sintez ammiaka* [Nitrogenist's Handbook: Physical and chemical properties of gases and liquids. Production of process gases. Purification of process gases. Synthesis of ammonia]. Moscow, Khimiya Publ., 1986. 512 p. (In Russian).
15. Dormeshkin O. B., Gavriluk A. N., Franckevich V. S., Mokhart M. S., Byshik A. A., Tribush N. A., Kasatov A. D. *Vliyaniye kaloriynosti prirodnogo gaza na velichinu raskhoda prirodnogo gaza: otchet o nauchno-issledovatel'skoy rabote KhD 24-078* [The influence of the calorific value of natural gas on the amount of natural gas consumption: research Report HD24-078]. Minsk, 2024. 98 p. (In Russian).

Информация об авторах

Дормешкин Олег Борисович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: dormeshkin@yandex.ru

Гаврилюк Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, проректор по учебной работе. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: gavriluk_andrew@mail.ru

Франкевич Виталий Станиславович – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: fvs2@tut.by

Мохорт Марк Сергеевич – аспирант кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: markmohort@gmail.com

Бышик Александр Александрович – инженер кафедры технологии неорганических веществ и общей химической технологии. Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: fxguru29@gmail.com

Information about the authors

Dormeshkin Oleg Borisovich – DSc (Engineering), Professor, Professor, Department of the Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dormeshkin@yandex.ru

Hauryliuk Andrei Nikolayevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Vice Rector for Academic Affairs. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gavrilyuk_andrew@mail.ru

Frantskevich Vitaliy Stanislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Machines and Devices of Chemical and Silicate Production. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fvs2@tut.by

Mokhart Mark Sergeyevich – PhD student, the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: markmohort@gmail.com

Byshik Aleksander Aleksandrovich – engineer, the Department of Technology of Inorganic Substances and General Chemical Technology. Belarusian State Technological University (13a Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fxguru29@gmail.com

Поступила 25.04.2025