

УДК 622.279

И. А. Чернов, магистрант  
В. Н. Диденко, доктор технических наук, профессор  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

МЕТОД УТИЛИЗАЦИИ ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО ГАЗА С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ АЗОТА НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ УДМУРТСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

В статье излагаются результаты исследования по актуальной проблеме утилизации попутного нефтяного газа (ПНГ) на месторождениях нефти Удмуртской Республики (УР), где ПНГ содержит в своем составе до 90 % азота и поэтому имеет теплоту сгорания в 4...5 раз меньше, чем у природного газа. Задачи исследования: выбор метода утилизации ПНГ применительно к условиям УР; анализ путей и способов технической реализации выбранного метода утилизации ПНГ; технико-экономическое обоснование принятого способа или установки для утилизации ПНГ. На основании произведенного анализа применимости существующих методов утилизации ПНГ к месторождениям УР выбран метод сжигания в когенерационных установках с преимущественным получением электроэнергии. Проведен сравнительный анализ характеристик двух типов когенерационных установок (электростанций), позволяющих сжигать ПНГ с теплотой сгорания менее 8,0 МДж/м<sup>3</sup>: газотурбинные установки (ГТУ) американской фирмы «Capstone» и газопоршневые установки (ГПУ) российской фирмы «GazEcos». Отмечаются главные технические достоинства рассматриваемой ГПУ: отсутствие дожимного компрессора; меньшая стоимость установки при одинаковой мощности; возможность использования газообразного топлива с теплотой сгорания от 4,19 МДж/м<sup>3</sup>; импортозамещение. Проводятся результаты расчета дисконтированного срока окупаемости, выбранной ГПУ, подтверждающие ее преимущество.

**Ключевые слова:** попутный нефтяной газ, утилизация, когенерация, газотурбинная установка, газопоршневая установка, технико-экономическое обоснование.

Утилизация попутного нефтяного газа (ПНГ) – одна из проблем России в нефтяной отрасли, которая является мировым лидером по объемам бесполезного сжигания ПНГ в факелах [1]. По этой причине принято постановление Правительства Российской Фе-

дерации (РФ) [2] о сроках доведения уровня использования ПНГ до среднемировых, т. е. до 95 %, начиная с 2012 г.

В табл. 1 приведены существующие методы утилизации ПНГ [3–6].

Таблица 1. Преимущества и недостатки известных методов утилизации ПНГ

Способ утилизации ПНГ	Преимущества	Недостатки
Закачка в пласт с целью увеличения дебита скважин	<ul style="list-style-type: none"> <li>Выполнение постановления Правительства РФ [7]</li> <li>Отсутствие вредных выбросов в атмосферу</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая стоимость оборудования</li> <li>Сложность технологии</li> <li>Угроза просадки почвы в местах закачки ПНГ</li> </ul>
Использование в качестве сырья для нефтехимических предприятий	<ul style="list-style-type: none"> <li>Выполнение постановления Правительства РФ [8]</li> <li>Получение продуктов нефтехимии</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Высокая стоимость оборудования и сложность технологических процессов</li> <li>Необходимость транспортировки ПНГ на значительные расстояния до нефтехимических предприятий</li> <li>Вредные выбросы предприятий</li> </ul>
Сжигание в печах и путевых подогревателях	<ul style="list-style-type: none"> <li>Выполнение постановления Правительства РФ [9]</li> <li>Получение тепловой энергии для технологических нужд и инфраструктуры</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Проблемы с горючестью в случае низкой теплоты сгорания</li> <li>Ограничение объемов сжигаемого ПНГ существующей инфраструктурой месторождения</li> <li>Вредные выбросы при сжигании (NO<sub>x</sub>)</li> </ul>
Сжигание в когенерационных установках	<ul style="list-style-type: none"> <li>Выполнение постановления Правительства РФ [10]</li> <li>Совместная выработка тепловой и электрической энергии</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Проблемы с горючестью в случае низкой теплоты сгорания</li> <li>Высокая техническая сложность и стоимость оборудования</li> <li>Проблемы надежности и сложности в эксплуатации</li> <li>Вредные выбросы при сжигании</li> </ul>
Сжигание в факелах	<ul style="list-style-type: none"> <li>Относительно других методов низкая стоимость оборудования и технологическая простота исполнения</li> <li>Меньшее содержание NO<sub>x</sub> по сравнению с сжиганием в других установках</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Законодательное ограничение объемов сжигания ПНГ (до 5 %)</li> <li>Экологические проблемы (вредные выбросы CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>)</li> <li>Проблемы со стабилизацией пламени из-за низкой теплоты и скорости сгорания ПНГ</li> </ul>

На некоторых месторождениях нефти Удмуртской Республики утилизация ПНГ затруднена из-за низкой теплоты сгорания газа ( $Q_n^p < 8,00$  МДж/м<sup>3</sup>),

обусловленной сильной забалластированностью его азотом (до 90 % по объемному составу).

Исследования проводились для ПНГ, состав которого представлен в табл. 2.

Таблица 2. Состав ПНГ с высоким содержанием азота

Компонент газа	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	H <sub>2</sub> S	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Σ
Состав, % по объему	4,18	2,04	2,31	1,45	0,65	0,2	0	0,03	<b>89,03</b>	0,11	100

В расчетах принималось: низшая теплота сгорания –  $Q_n^p = 7,92$  МДж/м<sup>3</sup> [11]; избыточное давление ПНГ –  $P_{изб.} = 0,01$  МПа; дебит ПНГ – 12000 м<sup>3</sup>/сут.

До последнего времени считалось, что ПНГ с такой теплотой сгорания является негорючим [12], но расчеты авторов [13] показали его горючесть, что впоследствии было подтверждено на практике специалистами нефтедобывающей компании.

Основными задачами исследования являлись:

1. Выбор метода утилизации низкокалорийного ПНГ с высоким содержанием азота на месторождениях Удмуртской Республики.

2. Анализ путей и способов технической реализации выбранного метода утилизации ПНГ.

3. Краткое технико-экономическое обоснование принятого способа или установки для утилизации ПНГ.

Из анализа табл. 1 следует, что при отсутствии развитой инфраструктуры на нефтяных месторождениях УР и отсутствии предприятий нефтехимии наиболее перспективным методом утилизации ПНГ на сегодняшний день, применительно к УР следует считать сжигание ПНГ в когенерационных установках с преимущественным получением электроэнергии.

Авторами проведен сравнительный анализ двух способов реализации метода когенерации:

- сжигание ПНГ с низкой теплотой сгорания в газотурбинных установках (ГТУ);
- сжигание ПНГ с низкой теплотой сгорания в газопоршневых установках (ГПУ).

Обзор существующих ГТУ показал, что большинство из них использует газ с высокой теплотой сгорания, значительно превышающей теплоту сгорания рассматриваемого ПНГ.

Исключение составляют только микротурбины фирмы «Capstone», в конструкции которых используются воздушные подшипники. В работе [14] для этих турбин приводится минимальное значение  $Q_n^p = 7,45$  МДж/м<sup>3</sup>, но в паспортных данных [15] указывается другое минимальное значение –  $Q_n^p = 10$  МДж/м<sup>3</sup>. Таким образом, нет полной уверенности в том, что микротурбины «Capstone» будут работать на газе с низшей теплотой сгорания  $Q_n^p = 7,92$  МДж/м<sup>3</sup>. Газотурбинных установок российского производства, аналогичных «Capstone», в настоящее время нет.

Далее рассматривались отечественные ГПУ, способные работать на ПНГ с теплотой сгорания  $Q_n^p \approx 8,0$  МДж/м<sup>3</sup>. В результате проведенного анализа рынка когенерационных установок и электростанций наиболее подходящей была признана ГПУ на основе двигателя «MAN» производства российской фирмы «GazEcos» [16]. (Существуют аналоги данной установки на основе двигателя «ЯМЗ» [17], но для рассматриваемого ПНГ этот аналог проигрывает по ресурсу работы до капитального ремонта.)

В табл. 3 приведены сравнительные характеристики ГТУ американской фирмы «Capstone» и ГПУ российской фирмы «GazEcos».

Таблица 3. Сравнительные характеристики ГТУ Capstone C30, Capstone C200 и ГПУ GazEcos MAN 200 кВт

Установки	ГТУ		ГПУ GazEcos MAN 200 кВт
	Capstone C30	Capstone C200	
Параметры установок			
Варианты исполнения	Модульное	Модульное	Открытое В контейнере
Номинальная электрическая мощность, кВт	30	200	200
Диапазон рабочего напряжения, В	380-480	380-480	400
Частота тока, Гц	50	50	50
Вес, кг	578	3180–3640	Открытое – 4210 В контейнере – 6610
Габариты (длина × ширина × высота), мм	1516 × 762 × 1943	3660 × 1700 × 2490	Открытого 3500 × 1400 × 2240 В контейнере 5000 × 2200 × 2350
Вид топлива	Газообразное топливо, керосин, дизель	Газообразное топливо, керосин, дизель	Газообразное топливо (природный, нефтяной попутный и пр.)
Рабочее избыточное давление топлива на входе, бар	3,6		0,025–0,05
Необходимость установки дожимного компрессора при низших значениях избыточного давления	Да	Да	Нет

Окончание табл. 3

Установки Параметры установок	ГТУ		ГПУ GazEcos MAN 200 кВт
	Capstone C30	Capstone C200	
Минимальное значение $Q_n^p$ , декларируемое производителем, МДж/м <sup>3</sup>	10	10	4,19
Расход газообразного топлива с $Q_n^p = 7,92$ МДж/м <sup>3</sup> при номинальной нагрузке, нм <sup>3</sup> /ч	52	282	250
Ресурс до капитального ремонта, ч	60 000	60 000	50 000 – 60 000
Страна-производитель	США	США	Российская Федерация
Стоимость одной установки под ключ, руб.	7 150 000	35 000 000	Открытого 7 620 000 В контейнере 8 500 000
Необходимое количество установок	10	2	2

Анализ (табл. 3) показывает следующие серьезные преимущества ГПУ GazEcos MAN 200кВт:

- нет необходимости в установке дожимного компрессора;
- меньшая стоимость установки при одинаковой мощности;
- возможность использования газообразного топлива с низкой теплотой сгорания (минимальное значение  $Q_n^p = 4,19$  МДж/м<sup>3</sup>);
- импортозамещение.

В табл. 4 представлены некоторые результаты технико-экономического обоснования применения данной газопоршневой установки.

**Таблица 4. Результаты технико-экономического обоснования применения газопоршневой установки производства «GazEcos» мощностью 200 кВт на основе двигателя «MAN» для электрогенерации при сжигании ПНГ с высоким содержанием азота (89,03 %)**

Период, год	Параметр	
	1	2
Стоимость проекта под ключ с подключением коммуникаций, руб.	17 000 000	
Номинальная мощность, кВт.	370	
Количество выработанной энергии в год, кВт·ч.	3 236 760	
Затраты на ТО 1 установки в ценах 2016 г, руб.	25 000	32 000
Суммарные затраты на ТО в ценах 2016 г, руб.	50 000	64 000
Прочие расходы, руб.	5 000	6 400
Годовые эксплуатационные расходы, руб.	55 000	70 400
Экономия на электроснабжении в год, руб.	10 422 367,20	10 943 485,56
Экономия за невыплату штрафов в год, руб.	716 000	
Чистый денежный поток, NCF, руб.	11 083 367	11 589 086
Ставка дисконтирования, %	15,8	15,8
Дисконтированный денежный поток, PV, руб.	9 571 129	8 642 354
Накопительный дисконт. денежный поток, руб.	9 571 129	18 213 483
Чистый дисконтированный доход, NPV, руб	-7 428 871	1 213 483

Из табл. 4 следует, что применение ГПУ «GazEcos» MAN 200 кВт для утилизации ПНГ с содержанием азота (N<sub>2</sub> ≈ 90 %) окупится меньше чем за 2 года, что является приемлемым и благоприятным показателем для инвестиций.

**Библиографические ссылки**

1. Утилизация попутного нефтяного газа. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.zaopolycom.ru/project/utit.html> (дата обращения: 01.02.2016).
2. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 января 2009 № 7.
3. ГРАСИС. Переработка попутного нефтяного газа [Электронный ресурс]. – URL: [http://www.grasys.ru/processing\\_of\\_associated\\_petroileum\\_gas](http://www.grasys.ru/processing_of_associated_petroileum_gas) (дата обращения: 20.11.2016).
4. Утилизация попутного нефтяного газа [Электронный ресурс]. – URL: <http://gazsurf.com/ru/stati/item/utilizatsiya-poputnogo-neftyanogo-gaza0/> (дата обращения: 11.12.2016).
5. Производственное оборудование и технологии «Промышленность России». Попутный нефтяной газ – его свойства и причины угрозы [Электронный ресурс]. – URL: [http://hromax.ru/utilizatsiya\\_poputnogo\\_neftyanogo\\_gaza.html/](http://hromax.ru/utilizatsiya_poputnogo_neftyanogo_gaza.html/) (дата обращения: 25.12.2016).
6. Попутный нефтяной газ: состав. Природный и попутный нефтяной газ. [Электронный ресурс]. – URL: <http://fb.ru/article/177498/poputnyiy-neftyanoy-gaz-sostav-prirodnyiy-i-poputnyiy-neftyanoy-gaz/> (дата обращения: 25.12.2016).
7. Постановление Правительства Российской Федерации от 8 января 2009 № 7.
8. Там же.
9. Там же.
10. Там же.
11. Ахмадишин И. И., Запасов Р. А., Чернов И. А. Оценка горючести попутного нефтяного газа с большим содержанием азота // Энергоресурсосбережение в промышленности, жилищно-коммунальном хозяйстве и агропромышленном комплексе [Электронный ресурс]: электрон. науч. изд. : матер. регион. науч.-практ. семинара / ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова». – Ижевск : ИННО-ВА, 2016. – С. 272–277. DOI: 62.624/978-5-9906851-6-1-2016-272-277.
12. Утилизация попутного нефтяного газа. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.zaopolycom.ru/project/utit.html> (дата обращения: 01.02.2016).
13. Ахмадишин И. И., Запасов Р. А., Чернов И. А. Оценка горючести попутного нефтяного газа с большим содержанием азота. С. 272–277.

14. Козлов П. А. Опыт внедрения технологий утилизации ПНГ на основе микротурбин на нефтегазовых объектах: примеры и результаты // Нефть. Газ. Новации : науч.-техн. журнал [Электронный ресурс]. – 2014. – № 8 – URL: <http://elibrary.ru/item.asp?id=22762562>. – С. 63–67. DOI:665.612.2:579.222.2/2077-5423-2014-8-63-67.

15. Capstone Turbine Corporation. Распределительные энергетические системы. [Электронный ресурс]. – URL: <http://capstone.ru/> (дата обращения: 11.11.2016).

16. GazEcos. Газопоршневые установки (газовые электростанции): проектирование, производство, установка [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gazecos.ru/> (дата обращения: 11.11.2016).

17. Там же.

\*\*\*

I. A. Chernov, Master's Degree Student, Kalashnikov ISTU

V. N. Didenko, DSc in Engineering, Professor, Kalashnikov ISTU

#### The Method of Utilization of Associated Petroleum Gas with High Nitrogen Content in the Fields of the Udmurt Republic

*The paper presents the results of a study on the topical problem of utilization of associated petroleum gas (APG) in the oil fields of the Udmurt Republic (UR), where APG contains up to 90% of nitrogen and therefore has a calorific value of 4...5 times less than that of natural gas. Objectives of the study are: selection of APG utilization method in relation to conditions of UR; analysis of ways and means of technical implementation of the selected method of APG utilization; feasibility study of the adopted method or installation for utilization of APG. Based on the analysis of the applicability of existing APG utilization methods to the UR fields, a combustion method in cogeneration plants with the production of electricity is chosen. The comparative analysis is performed for the characteristics of two types of cogeneration plants (power stations) allowing the combustion of APG with a combustion heat of less than 8.0 MJ/m<sup>3</sup>: gas turbine units (GTU) of the American firm "Capstone" and gas piston units (GPU) of the Russian company "GazEcos". The main technical advantages of the GPU under consideration are: no booster compressor; a lower cost of installation at the same power; the possibility of using gaseous fuel with a heat of combustion from 4.19 MJ / m<sup>3</sup>; import substitution. The results of calculating the discounted payback period chosen by the GPU, supporting its advantage, are presented.*

**Keywords:** associated petroleum gas, utilization, cogeneration, gas turbine unit, gas piston installation, feasibility study.

Получено: 13.04.17