

методов исследования.

Разработанный технологический процесс термовакuumной сушки и измельчения бурого угля позволяет оптимизировать энергетические затраты на единицу высушенной продукции, ускорить процесс сушки и получить альтернативное топливо в виде стандартных твердотопливных брикетов.

Технические возможности созданного термовакuumного метода могут найти широкое применение для получения нанодисперсных материалов в разных отраслях промышленного производства. Кроме того, термовакuumный метод позволяет минимизировать затраты на подготовку бурого угля к сжиганию на ТЭС, что приводит к уменьшению вредных выбросов в атмосферу при его сжигании.

### Литература

1. *International Patent*, a20507488 27.07.2005 UA, МПК F26B5/04; F26B23/06; F26B23/00. Apparatus for Drying of Wet Dispersed Raw Materials. / V. O. Kutovyi. – # PCT/UA2005/000051; Filing. 15.01.2005; Puplic. 01.02.2007; Publication number W0/2007/013866. – 6 p.
2. *Энергосберегающая* термовакuumная сушка и измельчения бурого угля / В. М. Кошельник, В. А. Кутовой, Ю. Г. Казаринов, А. С. Луценко // Наука техника, технологія, освіта, здоров'я: XXI міжнар. наук.-практ. конф. – Харків, Україна, 2013. – С. 297.
3. *Кошельник, В. М.* Научно-технические основы теплоэнергетических процессов термовакuumной сушки углеродных материалов / В. М. Кошельник, В. А. Кутовой, А. С. Луценко // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №12(1055). – С. 142–149.
4. *Кутовой В. А.* Разработка энергоэффективной методики сушки и измельчения углеродных материалов / В. А. Кутовой, И. С. Мысак // Восточ.-Европ. журн. передовых технологий. – 2014. – № 6/8 (72). – С. 35–40.
5. *Кутовой В. А.* Научно-практические основы энергосберегающего термовакuumного процесса сушки дисперсных материалов / В. А. Кутовой, А. С. Луценко, В. М. Кошельник // Вісн. Нац. техн. ун-ту «ХПІ». – 2013. – № 70 (1043). – С. 175–180.

Поступила в редакцию 15.09.15

**А. Л. Шубенко,**  
чл.-кор. НАН Украины  
**В. П. Сарапин**

Институт проблем  
машиностроения  
им. А. Н. Подгорного  
НАН Украины,  
г. Харьков,  
e-mail: shuben@kharkov.ua,  
sarapin\_v@mail.ru

УДК 621.692.3

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИРОДНОГО ГАЗА ДЛЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ С РАЗНОНАПОРНЫМИ СКВАЖИНАМИ

*Удосконалена принципова схема низькотемпературної сепарації природного газу, що призначена для відділення низькокиплячих вуглеводнів на родовищах із свердловинами, які мають різний пластовий тиск газу. Для підвищення тиску газу низьконапірних свердловин перед обладнанням низькотемпературної сепарації запропоновано використовувати компресор, що приводиться до дії турбодетандером. У останньому природний газ розширюється за рахунок надлишкового тиску газу високонапірних свердловин до тиску потоку газу, стиснутого у компресорі, що забезпечує температуру точки роси в обладнанні сепарації.*

**Ключові слова:** природний газ, точка роси, низькотемпературна сепарація, технологічна схема, турбодетандер, компресор.

### Введение

Природный газ в Украине является одним из основных энергоносителей. По данным НАК «НАФТОГАЗ» Украины потребление газа в 2014 г. составило 42,6 млрд. м<sup>3</sup>, при этом собственная добыча ~20,5 млрд. м<sup>3</sup> (48% от потребления) [1, 2]. Зависимость от импорта природного газа является одной из причин политических и экономических проблем современной Украины. Поэтому увеличение добычи природного газа, повышение качества его переработки и транспортировки относятся к важнейшим направлениям развития экономики страны [3]. В этой связи рассматриваемый в настоящей публикации способ усовершенствования технологии переработки природного газа является весьма актуальным.

© А. Л. Шубенко, В. П. Сарапин, 2015

На газовых промыслах для переработки природного газа, добытого из скважин, перед подачей в газовую магистраль используют технологические схемы, обеспечивающие низкотемпературную сепарацию газа (НТС). С помощью оборудования, включаемого в такую схему, происходит очистка, осушка природного газа и отделение фракций низкокипящих углеводородов. Для выделения из природного газа низкокипящих углеводородов в сепараторе необходимо обеспечить температуру точки росы [4–6], что достигается путем охлаждения природного газа.

### **Традиционная технологическая переработка природного газа**

Для получения холода с достижением точки росы на промысле в основном реализуется расширение газа при постоянной энтальпии (эффект Джоуля-Томсона [7]) с использованием дроссельных устройств. Соответствующие технологические схемы НТС реализуются как с рекуперативным теплообменником, так и без него. Достоинство таких схем – низкая стоимость оборудования при высокой надежности в работе [8]. Существенным недостатком схемы НТС с дросселирующим устройством является потребность в большом перепаде давления природного газа на промысле. Для варианта схемы без рекуперативного теплообменника показатель снижения температуры составляет 1,94 бара/°С, а для варианта с рекуперативным теплообменником 0,55 бара/°С. В процессе эксплуатации скважин пластовое давление газа снижается. В результате при использовании схем НТС с дросселирующим устройством для расширения газа не достигается температура точки росы, что приводит к снижению качества газа.

Чтобы компенсировать падение давления газа в скважинах перед установкой НТС, обычно используют дожимную компрессорную станцию (ДКС). Приводом для дожимного компрессора чаще всего служит газотурбинный двигатель, работающий на добытом газе. Поскольку ДКС является дорогостоящим оборудованием, то ввод ее в эксплуатацию стремятся отложить. В этом случае вместо дросселирующего устройства в качестве источника холода используется турбодетандер (ТД) [9, 10]. Это связано с тем, что процесс расширения в турбодетандере близок к адиабатическому, который позволяет при одинаковом перепаде давления получить большее снижение температуры по сравнению с процессом в дросселирующем устройстве. На одном валу с турбодетандером располагают электрогенератор (ЭГ) или компрессор (К). В схемах НТС с электрогенератором [11] показатель снижения температуры составляет 0,25 бара/°С, а в схемах с компрессором, который частично восстанавливает давление газа после расширения в турбодетандере, этот показатель 0,11 бара/°С. Чаще используют схемы НТС с турбодетандером и компрессором, расположенными на одном валу. Схемы НТС с ЭГ используют в тех случаях, когда необходимо получать электроэнергию для собственных нужд или когда перепада давления достаточно для достижения температуры точки росы.

### **Новая принципиальная схема низкотемпературной сепарации природного газа**

В процессе эксплуатации газового месторождения в различных скважинах давление газа падает неравномерно. Появляются скважины с низким пластовым давлением, так называемые низконапорные скважины. Величина давления газа низконапорных скважин недостаточная для использования в технологической схеме в комплексе с другими скважинами, поскольку давление газа во входном коллекторе является недостаточным для достижения при расширении точки росы. Поэтому скважину, которая в процессе эксплуатации стала низконапорной, обычно отключают от общей добычи природного газа.

Разработан ряд технологических схем низкотемпературной сепарации газа, которые эффективно работают только при незначительном снижении давления низконапорных скважин. Наиболее распространенная схема, когда газ из низконапорных скважин после предварительной очистки направляют в компрессор турбодетандерного агрегата (ТДА), минуя низкотемпературную сепарацию. Существенным недостатком такой схемы является факт относительно малого использования газа из низконапорных скважин, поскольку при увеличении подмешивания газа из низконапорных скважин нарушается баланс мощности между турбиной и компрессором, вследствие чего не достигается температура точки росы в низкотемпературном сепараторе, снижается качество газа по содержанию низкокипящих углеводородов.

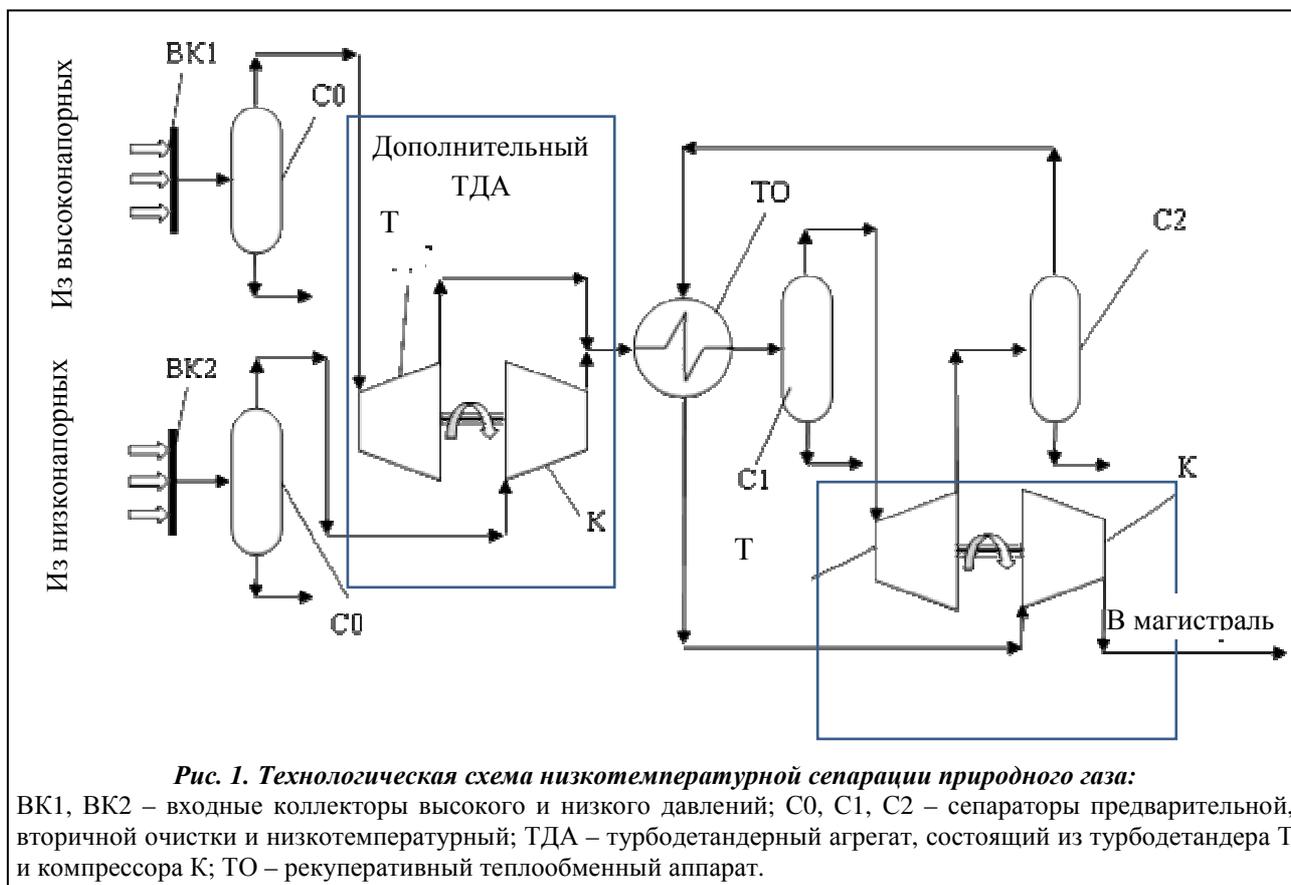
Конечно, возможны схемы с использованием ДКС в линии низконапорных скважин, но, как отмечалось выше, данное мероприятие является затратным и может быть оправдано лишь при отсутствии других, экономически более выгодных, технологических решений.

Таким образом, появилась необходимость в разработке новой экономичной схемы низкотемпературной сепарации природного газа. Новая схема разработана на основе схемы НТС с источником холода ТДА (см. рис. 1) [12]. Она позволяет за счет разделения газовых потоков существенно увеличить добычу газа из газового месторождения, имеющего высоконапорные и низконапорные скважины. В линию высокого давления устанавливается дополнительный турбодетандер ТДА, в линию низкого давления – дополнительный компрессор ТДА, расположенные на одном валу. Предложенная модификация схемы НТС с разделением на линии по давлению может быть использована и для схем в качестве источника холода, в которых используется дросселирующее устройство.

Для анализа возможностей предлагаемой технологической схемы НТС с целью определения связей между характеристиками потоков газа скважин высокого и низкого давления разработана математическая модель, в основу которой положено следующее. Для поддержания требуемого значения давления на входе в рекуперативный теплообменник необходимо, чтобы выполнялось условие баланса мощностей между дополнительными турбодетандером и компрессором [13], которое имеет вид

$$G_1 \cdot \frac{k_1}{k_1 - 1} \cdot T_1 \cdot R_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{P_{ТО}}{P_1} \right)^{\frac{k_1 - 1}{k_1}} \right] \cdot \eta_T = G_2 \cdot \frac{k_2}{k_2 - 1} \cdot T_2 \cdot R_2 \cdot \left[ \left( \frac{P_{ТО}}{P_2} \right)^{\frac{k_2 - 1}{k_2}} - 1 \right] \cdot \frac{1}{\eta_K},$$

где  $G_1, G_2$  – массовые расходы газа в линиях высокого и низкого давлений,  $k_1, k_2$  – показатели адиабаты для газа линий высокого и низкого давлений,  $R_1, R_2$  – газовые постоянные для газа линий высокого и низкого давлений,  $P_1, P_2, P_{ТО}$  – давления газа в линиях высокого, низкого давлений и на входе в рекуперативный теплообменный аппарат,  $\eta_T, \eta_K$  – коэффициенты полезного действия турбодетандера и компрессора.



Как видно из уравнения, количество газа с низким давлением  $G_2$ , которое может быть сжато, зависит от количества газа с высоким давлением  $G_1$  и величины давления газа этих потоков, а также показателей эффективности турбодетандера и компрессора ( $P_{T0}$  обычно задано для эффективной работы технологической схемы).

Зная  $P_{T0}$ , используя уравнения состояния и материального баланса при смешении потоков из турбодетандера и компрессора, несложно рассчитать также величину температуры газа на входе в рекуперативный теплообменный аппарат  $T_{T0}$ .

Для иллюстрации зависимости  $T_{T0} = Y(P_2, G_1/G_2)$  и  $P_1 = F(P_2, G_1/G_2)$  представлены на рис. 2 при следующих значениях характеристик: температура газа в устьях скважин  $T_1 = T_2 = 10^\circ\text{C}$ , массовый расход газа из высоконапорных скважин  $G_1 = 30$  кг/с (131,7 тыс. ст. м<sup>3</sup>/ч), давление газа на входе в рекуперативный теплообменник  $P_{T0} = 4,0$  МПа (абс), давление подачи газа в газовую магистраль 3,0 МПа (абс).

Еще один положительный эффект предложенной схемы заключается в увеличенном выходе газового конденсата при снижении температуры газа на входе в рекуперативный теплообменник (см. рис. 2) за счет смешения охлажденного потока газа из высоконапорных скважин с менее нагретым газом из низконапорных скважин.

### Заключение

Применение предлагаемой новой схемы НТС обеспечивает добычу природного газа и газового конденсата из низконапорных скважин за счет использования имеющегося энергетического потенциала скважин высокого давления. При этом выходная температура газа, поступающего в рекуперативный теплообменник после смешения обоих потоков, ниже температуры газа, выходящего из скважин, что упрощает конструкцию рекуперативного теплообменника и уменьшает затраты, необходимые для достижения температуры точки росы в низкотемпературном сепараторе.

По предварительным оценкам, срок окупаемости предлагаемого технического решения – от 2 до 3 лет, в зависимости от производительности скважин.

Поскольку предлагаемая схема зависит от конкретных значений физических параметров высоконапорных и низконапорных скважин, то в каждом случае необходимо проводить дополнительный анализ с дальнейшим выбором требуемого оборудования.

### Литература

1. У 2014 році приватні видобувники газу наростили виробництво на 18% [Электронный ресурс] – [2015]. – Официальный сайт НАК Нафтогаз Украины. – Режим доступа: <http://www.naftogaz.com> – Последнее обращение 09.07.2015.
2. У 2014 році Україна скоротила споживання природного газу на 16% [Электронный ресурс] – [2015]. – Официальный сайт НАК Нафтогаз Украины. – Режим доступа: <http://www.naftogaz.com> – Последнее обращение 09.07.2015.
3. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Электронный ресурс] – [2013]. – Официальный сайт Верховной Рады Украины. – Режим доступа: <http://zakon2.rada.gov.ua> – Последнее обращение 16.07.2015.
4. Гуревич, Г. Р. Сепарация природного газа на газоконденсатных месторождениях / Г. Р. Гуревич. – М.: Недра, 1982. – 200 с.
5. Ширковский, А. И. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений / А. И. Ширковский. – М.: Недра, 1979. – 303 с.

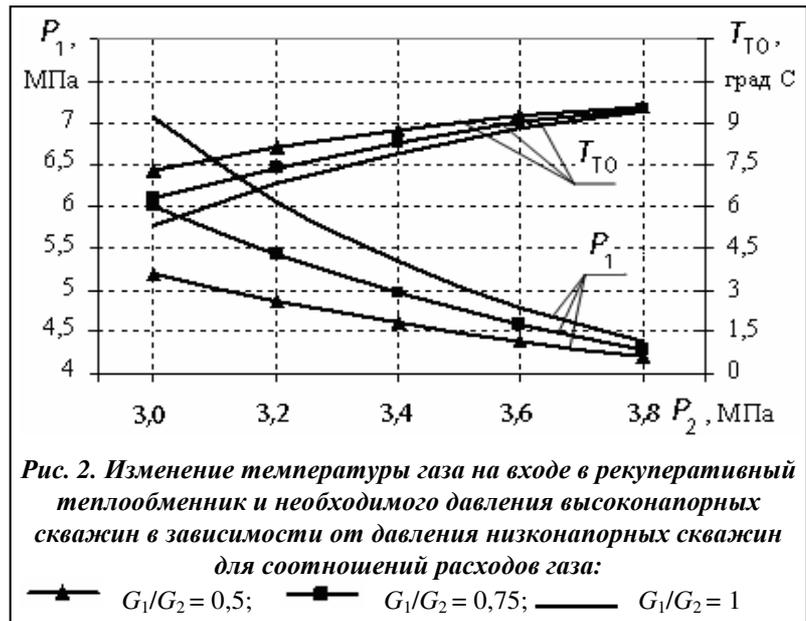


Рис. 2. Изменение температуры газа на входе в рекуперативный теплообменник и необходимого давления высоконапорных скважин в зависимости от давления низконапорных скважин для соотношений расходов газа:

▲  $G_1/G_2 = 0,5$ ; ■  $G_1/G_2 = 0,75$ ; ●  $G_1/G_2 = 1$

6. *Брусиловский, А. И.* Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа / А. И. Брусиловский. – М.: Грааль, 2002. – 575 с.
7. *Сивухин, Д. В.* Общий курс физики. Учеб. пособие. В 5-ти т. Т. II. Термодинамика и молекулярная физика. – 5-е изд., испр. / Д. В. Сивухин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 544 с.
8. *Бекиров, Т. М.* Технология обработки газа и конденсата / Т. М. Бекиров, Г. А. Ланчаков. – М.: Недра, 1999. – 596 с.
9. *Язык, А. В.* Системы и средства охлаждения природного газа. / А. В. Язык. – М.: Недра, 1986. – 200 с.
10. *Моисеев, С. В.* Численное моделирование переменных режимов работы ТДА / С. В. Моисеев, А. В. Бурняшев, В. П. Сарапин // *Авиац.-косм. техника и технология.* – 2005. – Т. 8 (24). – С. 72–76.
11. *Степанец, А. А.* Энергосберегающие турбодетандерные установки / А. А. Степанец. – М.: ООО «Недра-бизнесцентр», 1999. – 258 с.
12. *Пат. 97282* Україна, МПК (2014.01) F25B 11/00, F25J 3/08 Установка низькотемпературної обробки природного газу / В. П. Сарапін, О. Л. Шубенко. – Опубл. 10.03.2015, Бюл. № 5.
13. *Епифанова, В. И.* Компрессорные и расширительные турбомашини радиального типа / В. И. Епифанова. – М.: Машиностроение, 1984. – 376 с.

*Поступила в редакцию 10.09.15*