

УДК 661.666.4:658.261:665.6/7

**ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ КОМБИНИРОВАНИЕ В СИСТЕМАХ
УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОДАВЛЯЮЩИХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ****Долотовский И.В., Попов А.И., Ушаков К.Г.***ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»,
Саратов, e-mail: dolotowsky@mail.ru*

Предлагается ресурсоэнергоэффективная технология утилизации низконапорных углеводородных газов в системе комбинированной выработки технического углерода, электрической и тепловой энергии. Разработана технологическая схема установки, а также основные технические решения по перспективному нестандартному технологическому оборудованию. Конструкция реактора для пиролиза углеводородных газов обеспечивает непрерывный цикл эксплуатации с возможностью выработки различных марок технического углерода путем изменения режимных параметров. Сжигание на горелках реактора газовых, жидкофазных горючих отходов и пиролизного газа с последующим использованием теплоты продуктов сгорания для выработки энергоносителей обеспечивает повышение энергоэффективности и экологической безопасности установки. Приводится математическая модель материального баланса процесса генерации технического углерода в виде потокового графа и результаты его расчета для одного из режимов установки производительностью 0,5...5 м³/с по утилизируемому газу.

Ключевые слова: низконапорные углеводородные газы, утилизация, технический углерод, выработка энергии, ресурсосбережение, математическое моделирование, материальный баланс

**ENERGY-TECHNOLOGICAL COMBINATION IN THE SYSTEM
OF UTILIZATION OF LOW-PRESSURE HYDROCARBON GASES****Dolotovskiy I.V., Popov A.I., Ushakov K.G.***Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A., Saratov, e-mail: dolotowsky@mail.ru*

The resource-energy efficient technology for utilization of low-pressure hydrocarbon gases in a system of combined production of technical carbon, electric and thermal energy is proposed. Developed the technological scheme of the installation, as well as the main technical solutions for perspective non-standard technological equipment. The design of the reactor for the pyrolysis of hydrocarbon gases provides a continuous cycle of operation with the ability to generate different grades of carbon black by changing the operating parameters. Combustion of gas, liquid-phase combusted wastes and pyrolysis gas on the reactor burners, followed by the use of the heat of combustion products for the generation of energy carriers, ensures an increase in the energy efficiency and environmental safety of the installation. Given a mathematical model of material balance of the process of generation of technical carbon in the form of a flow-graph and the calculation results for one of the modes for the installation with a capacity of 0.5 ... 5 m³/s for the utilization gas.

Keywords: low-pressure hydrocarbon gases, hydrocarbon recovery, black carbon, energy production, resource conservation, math modeling, material balance

На предприятиях нефтегазовой отрасли (ПНГО) утилизация низконапорных углеводородных газов (УВГ) и попутных нефтяных газов (ПНГ), сбрасываемых на факел в тех или иных технологических ситуациях, представляет актуальную производственную проблему. Решение этой задачи с использованием факельных установок связано с выбросами токсичных веществ в атмосферу, осложнением экологической обстановки в соответствующих районах расположения объектов и экономически невыгодно в связи со значительными платежами за загрязнение окружающей среды. Поэтому разработка типовых проектных решений энерготехнологического комбинирования в системах утилизации низконапорных УВГ и ПНГ позволяет решить ряд проблем, вызванных непосредственным сжиганием этих ценных технологических ресурсов на факелах.

Проведенный анализ технологий и технических решений по вовлечению

УВГ и ПНГ в энерготехнологический баланс ПНГО, предложенных в научных разработках ИХФ РАН имени Н.Н. Семенова, ООО «Газпром ВНИИГАЗ» [1, 2], ООО «Рэмнефтегаз» [3], ООО ФПК «Космос-Нефть-Газ» [4, 5], ЗАО ГК «Рус-ГазИнжиниринг» [6], Тюменского государственного нефтегазового университета и других организаций [7–9], показал, что в настоящее время доминирует энергетическое направление использования УВГ и особенно ПНГ. Нефтехимическое направление утилизации, хотя и является наиболее перспективным и экономически целесообразным, зависит от многих влияющих факторов и конъюнктуры рынка, что обуславливает необходимость системного подхода при его практической реализации. Как отмечается в [1, 2], основным препятствующим обстоятельством внедрения технических решений нефтехимического направления утилизации УВГ

и ПНГ является экономическая нерентабельность при производительности по готовой продукции менее 0,6 млн т/год. В данных условиях одним из вариантов утилизации низконапорных УВГ и ПНГ может быть переработка их на технический углерод (ТУ) [10], который широко используется в химической, резинотехнической промышленности, электротехнической, лакокрасочной, полиграфической и ряде других отраслей.

В отличие от действующих (например, производство термического ТУ на Сосногорском газоперерабатывающем заводе [11, 12]) разработанная установка [10] (рис. 1) имеет лучшие технико-экономические и экологические показатели: за счет реализации непрерывного процесса пиролиза повышается выход продукции и исключается ее выброс в окружающую среду; этому же способствует утилизация пиролизного газа на горелках реактора.

При работе установки газообразное сырье (УВГ и ПНГ) поступает в реакционную камеру реактора 1, где под действием теплового излучения происходит пиролиз сырья и образование сажегазовой смеси.

Охлажденная в устройстве испарительного охлаждения 2 сажегазовая смесь, содержащая водяные пары, поступает в фильтр 3. Особенностью реактора является отдельный вывод из него дымовых газов – из горелочных камер, и сажегазовой смеси – из реакционной камеры.

Осушка пиролизного газа от водяных паров осуществляется в эжекторном скруббере 7. Осушенный пиролизный газ газодувкой 4 подается на горелки реактора, а также на обратную продувку фильтрующей поверхности фильтра. Перемещение тухлорода от фильтра 3 к циклону 10 осуществляется системой пневмотранспорта; транспортирующий агент перемещается газодувкой 6. Воздух на горелки подается дутьевым вентилятором 5.

Для утилизации теплоты дымовых газов, получающихся в результате сжигания топливного и осушенного пиролизного газов в реакторе, установлен котел-утилизатор 13. Выработываемый в котле-утилизаторе перегретый пар направляется далее в паровую турбину 14 с целью получения электроэнергии для собственных нужд установки и ПНГО.

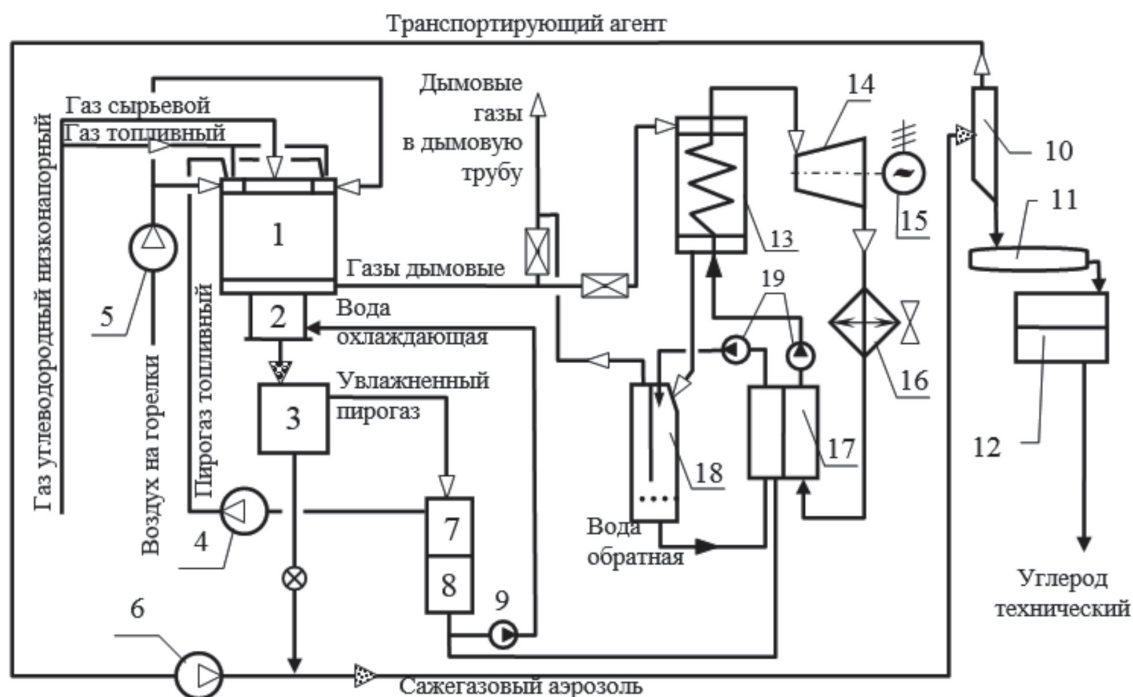
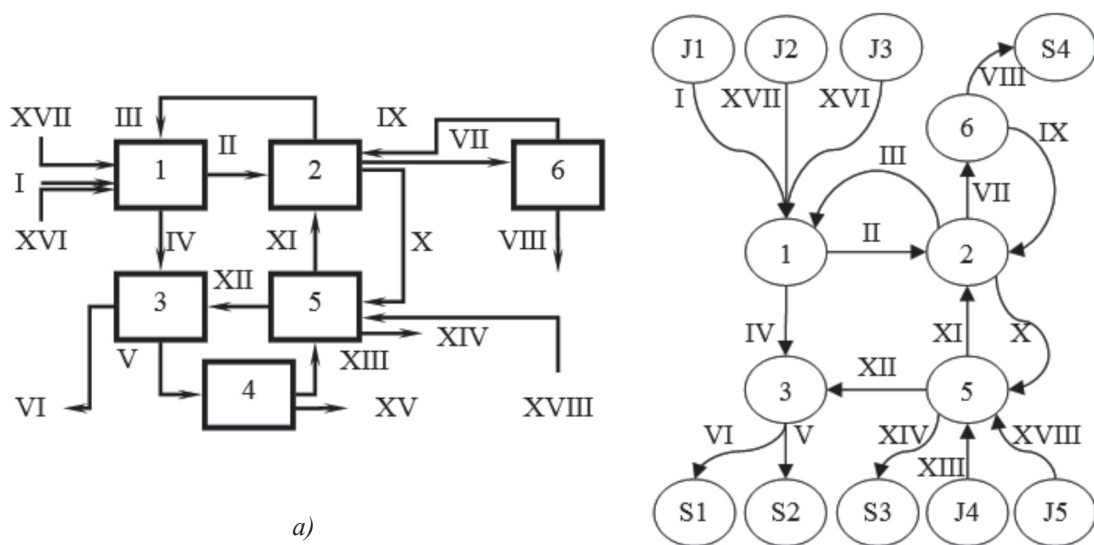


Рис. 1. Технологическая схема утилизации низконапорного УВГ: 1 – реактор; 2 – охладитель сажегазовой смеси; 3 – фильтр; 4, 6 – газодувки; 5 – вентилятор; 7 – блок подготовки пирогаза; 8 – блок охлаждения воды; 9, 19 – насосы воды; 10 – циклон-уплотнитель; 11 – барабан грануляционный; 12 – блок подготовки товарного технического углерода; 13 – котел-утилизатор; 14 – паровая турбина; 15 – электрогенератор; 16 – конденсатор (аппарат воздушного охлаждения); 17 – блок подготовки питательной и очищенной воды; 18 – эжекционный охладитель



1–4 – блоки: 1 – реакторный; 2 – технологического кондиционирования пирогаза; 3 – выработки тепловой энергии; 4 – генерации электроэнергии; 5–6 – системы: 5 – подготовки обессоленной и охлаждающей воды; 6 – транспорта сажегазового аэрозоля и подготовки товарного ТУ

J1...J5 – вершины – источники материальных потоков; S1...S4 – вершины – стоки материальных потоков

I – газ сырьевой; II – продукты реакции; III – топливный пирогаз; IV, VI – газы дымовые; V – водяной пар; VII – сажегазовый аэрозоль; VIII – углерод технический; IX – транспортирующий агент; X, XI, XII, XVIII – вода нагретая, охлаждающая, обессоленная, техническая; XIII – паровой конденсат; XIV – дренаж; XV – электроэнергия; XVI – топливный газ; XVII – воздух

Рис. 2. Структурная схема базового варианта установки (а) и материальный потоковый граф (б)

Дымовые газы после котла направляются в эжекционный охладитель 18, где происходит конденсация содержащихся в них водяных паров в объеме факела воды, создаваемого форсунками. Нагретая обратная вода из эжекционного охладителя поступает в блок подготовки питательной и очищенной воды, а также может подаваться в систему теплоснабжения ПНГО. При автономной работе реакторного блока дымовые газы направляются через эжекционный охладитель в дымовую трубу. В нестандартных ситуациях дымовые газы сбрасываются в дымовую трубу без утилизации теплоты.

В предлагаемой установке качество получаемого товарного ТУ значительно выше, по сравнению с известными установками, поскольку ТУ содержит меньше посторонних включений, вносимых с охлаждающей водой на испарительное охлаждение сажегазовой смеси в охладитель 2. Это обеспечивается прогрессивными техническими решениями, примененными в системе фильтрации 3, в блоках подготовки (осушки и охлаждения) пирогаза 7 и подготовки охлаждающей воды 8. Кроме того, требуемая

чистота конденсата, подаваемого насосом 9, обеспечивается подпиткой системы испарительного охлаждения сажегазовой смеси дистиллятом технической воды, получаемой в эжекционном охладителе дымовых газов 18. Уменьшению содержания посторонних включений в товарном техуглероде способствует также перемещение сажегазового аэрозоля с помощью системы пневмотранспорта.

Во взаимосвязанных аппаратах и агрегированных устройствах разработанной установки осуществляются термохимические, теплообменные, электрические, механические, массообменные процессы. Для расчета и выбора соответствующего оборудования требуется разработка технического проекта с учетом специфики перечисленных процессов, влияния климатических, технико-экономических факторов, конструктивных характеристик унифицированных и вновь разрабатываемых аппаратов. При этом конструктивные и эксплуатационные характеристики установки должны удовлетворять выбранному критерию эффективности.

Решение данной задачи с учетом влияния всех факторов в условиях проектирования, эксплуатации и динамики состава УВГ и ПНГ невозможно без применения принципов системных исследований и математического моделирования. Последовательность математического моделирования установки состоит из следующих основных этапов [12]:

- разработка структурных и операционных схем альтернативных вариантов;
- математическое моделирование отдельных элементов (аппаратов) на основе аналитического, экспериментального, комбинированного методов;
- структурно-параметрический синтез установки, удовлетворяющей оптимальному критерию эффективности.

На первом этапе в качестве базового варианта принята технологическая схема установки, приведенная на рис. 1. На структурной схеме этого варианта, используемой для разработки функциональных моделей материального и энерготехнологического балансов (рис. 2, а), показаны связи отдельных блоков по физическим потокам. Каждый блок объединяет несколько аппаратов установки. В процессе математического моделирования структурная схема модифицируется в зависимости от типа решаемых задач.

При разработке материального баланса соединяющие отдельные блоки дуги соответствуют обобщенным материальным потокам (рис. 2, б). Материальный баланс для установки в целом и для отдельных блоков определяется при решении системы уравнений, которая позволяет определить шесть независимых переменных (массовые расходы материальных потоков $G_I \dots G_{XVIII}$) при условии, что остальные одиннадцать расходов материальных потоков являются заданными величинами:

$$G_I + G_{XVI} + G_{XVII} + G_{III} = G_{II} + G_{IV},$$

$$G_{II} + G_{IX} + G_{XI} = G_{III} + G_{VII} + G_X,$$

$$G_{IV} + G_{XII} = G_V + G_{VI},$$

$$G_X + G_{XIII} + G_{XVIII} = G_{XI} + G_{XII} + G_{XIV},$$

$$G_{VII} = G_{VIII} + G_{IX},$$

$$G_I + G_{XIII} + G_{XVI} + G_{XVII} + G_{XVIII} = G_V + G_{VI} + G_{VIII} + G_{XIV}.$$

Расчет материальных балансов отдельных аппаратов, агрегатов и блоков выполняется с использованием разработанных математических моделей этих элементов

установки [12]. Например, для реакторного блока количество воздуха G_{XVII} , необходимого для процесса образования углерода, а также полученных продуктов реакции G_{II} (технического углерода G_{VIII} и газов пиролиза G_{III}), определялось из уравнений балансов углерода, водорода, азота и кислорода [11, 12] в соответствующих потоках на входе и выходе реактора:

$$\text{углерод} - G_{C_I} = G_{C_{VIII}} + g_{C_{IX}} \cdot V_{IX},$$

$$\text{водород} - G_{H_{2_I}} = G_{H_{VIII}} + g_{H_{2_{IX}}} \cdot V_{IX},$$

$$\text{азот} - G_{N_{2_{XVII}}} = g_{N_{2_{IX}}} \cdot V_{IX} + g_{N_{2_{IV}}} \cdot V_{IV},$$

$$\text{кислород} - G_{O_{2_{XVII}}} = G_{O_{VIII}} + g_{O_{2_{IX}}} \cdot V_{IX} + g_{O_{2_{IV}}} \cdot V_{IV},$$

где $g_{C_{IX}}, g_{H_{2_{IX}}, g_{N_{2_{IX}}, g_{N_{2_{IV}}, g_{O_{2_{IX}}, g_{O_{2_{IV}}}}$ – содержание углерода, водорода, азота, кислорода в соответствующих газовых потоках; V_{IV}, V_{IX} – объемные расходы продуктов сгорания и транспортирующего агента (отходящих газов); $G_{C_I}, G_{C_{VIII}}, G_{H_{2_I}}, G_{H_{VIII}}$ – масса углерода и водорода в сырьевом газе и техническом углероде; $G_{N_{2_{XVII}}}, G_{O_{2_{XVII}}}$ – масса азота и кислорода в поступающем потоке воздуха.

Если в качестве сырья кроме газовой фазы подаются жидкие углеводороды, то в левой части уравнений баланса углерода и водорода добавляются массовые расходы этих компонентов в жидкофазном потоке на входе в реактор.

Массовые расходы водяных паров, входящих в продукты реакции (поток II), и воздуха (поток XVII) определяются по соответствующим балансовым уравнениям:

$$G_{H_2O} = 8,937 \frac{G_{H_{2_I}} \left(0,3021 g_{N_{2_{IX}}} + \left(\frac{O}{C} \right)_{VIII} g_{C_{IX}} \right) - \dots}{7,9366 g_{H_{2_{IX}}} + 0,3021 g_{N_{2_{IX}}} - \dots} \dots$$

$$\dots \frac{-g_{O_{2_{IX}}} - G_{C_I} \left(\left(\frac{O}{C} \right)_{VIII} g_{H_{2_{IX}}} + 0,3021 \times \dots}{7,9366 H_{VIII} - O_{VIII} - \dots} \dots}{C_{VIII} g_{C_{IX}} - \dots} \dots$$

$$\dots \frac{\times \left(\frac{H}{C} \right)_{VIII} g_{N_{2_{IX}}} - \left(\frac{H}{C} \right)_{VIII} g_{O_{2_{IX}}}}{-g_{O_{2_{IX}}}};$$

$$G_{XVII} = \frac{g_{N_{2_{IX}}} \left[7,9366 G_{H_{2_I}} - \frac{7,9366 H_{VIII} - O_{VIII}}{C_{VIII}} \times \dots}{7,9366 g_{H_{2_{IX}}} + 0,3021 g_{N_{2_{IX}}} - \dots} \dots \right]}{\dots} \dots$$

$$\dots \frac{\times G_{C_I}}{- \frac{7,9366 H_{VIII} - O_{VIII}}{C_{VIII}} g_{C_{IX}} - g_{O_{2_{IX}}}}.$$

С использованием разработанных математических моделей отдельных аппаратов, агрегатов и блоков установки утилизации низконапорных УВГ ПНГО выполнен рас-

чет материальных балансов для различных эксплуатационных режимов, отличающихся составом сырьевого и топливного газов. В стационарном режиме установка имеет следующие основные технические характеристики:

- объемная производительность по утилизируемому газу 0,5...5 $\text{м}^3/\text{с}$;
- относительный выход ТУ из углерода утилизируемого газа (в зависимости от марки) 15...40% по массе;
- относительное количество теплоты, вырабатываемой в системе утилизации дымовых газов – (10...15) МДж/ м^3 утилизируемого газа;
- удельное потребление электроэнергии на собственные нужды – 1120 кВт·ч/тонну ТУ;
- удельная выработка электроэнергии – 1430 кВт·ч/тонну ТУ.

Результаты расчета для одного из режимов, когда в качестве сырья используется газ природный стандартный, приведены на рис. 3.

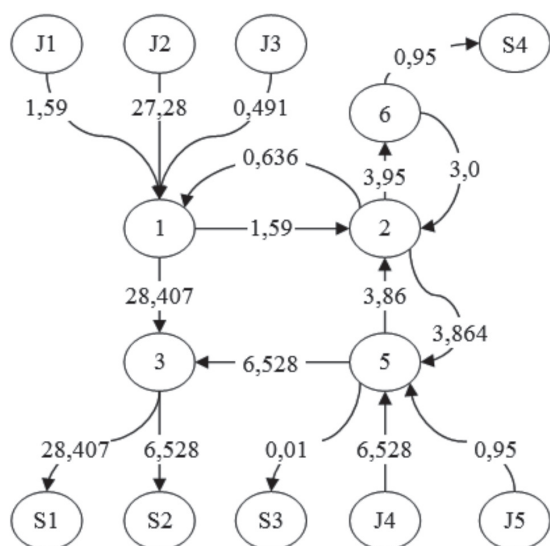


Рис. 3. Материальный баланс (кг/с) установки утилизации УВГ

На этапе синтеза установки с указанными выше расходными характеристиками материальных потоков применено типовое оборудование в системе генерации тепловой и электрической энергии – котел-утили-

затор КУ-150М, турбина с противодавлением без регулируемого отбора пара Р-4-35/5, конденсатор воздушного охлаждения АВЗ-20-0,6-БЗ-Т2/6-1-6 (ТУ 26-02-1043-87).

Таким образом, реализация принципов интеграции технологических и энергетических процессов в производственном цикле системы утилизации низконапорных УВГ и ПНГ ПНГО позволяет осуществить автономное энергообеспечение и выработку технического углерода при высокой степени конверсии сырья и экологической безопасности.

Работа выполнена в рамках госзадания при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

Список литературы

1. Утилизация сбросных углеводородных газов / В.С. Арутюнов [и др.] // Газовая промышленность. – 2000. – № 3. – С. 62–64.
2. Арутюнов В.С. Новые технологии утилизации природных и попутных газов // Нефть + газ. Инновации. – 2009. – № 2. – С. 57–62.
3. Коваль В.Н. Космические технологии утилизации попутного газа / В.Н. Коваль, В.А. Фатихов // Газовая промышленность. – 2011. – № 4. – С. 76–78.
4. Утилизация низконапорных углеводородных газов различного состава / И.Г. Лачугин [и др.] // Газовая промышленность. – 2013. – № 4. – С. 88–89.
5. Современные технологии переработки низконапорного газа и предпосылки их реализации / С.Н. Меньшиков [и др.] // Газовая промышленность. – 2014. – № S716 (716). – С. 56–59.
6. Зиберт А.Г. Инновационные технологии и оборудование по утилизации попутного нефтяного газа / А.Г. Зиберт, Г.К. Зиберт // Газовая промышленность. – 2011. – № 6. – С. 80–82.
7. Финько В.Е. Производство электроэнергии из факельных газов / В.Е. Финько, В.В. Финько // Газовая промышленность. – 2006. – № 2. – С. 84–88.
8. Медведев Б.И. Технологии переработки попутного нефтяного газа / Б.И. Медведев, Л.Ю. Кондратьева // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 5. – С. 9–11.
9. Васильева Е.А. Получение сажи как один из способов утилизации ПНГ / Е.А. Васильева, О.А. Калименова, Г.Ф. Мурзакаева // Экспозиция «Нефть. Газ». – 2013. – № 1 (26). – С. 8–10.
10. Заявка 2017109929 РФ, МПК С09С1/54. Установка для производства технического (термического) углерода из газообразного углеводородного сырья / И.В. Долотовский. – № 2017109929; заявл. 17.03.2017.
11. Зуев В.П. Производство сажи / В.П. Зуев, В.В. Михайлов. – М.: Химия, 1965. – 328 с.
12. Долотовский И.В. Энергетический комплекс предприятий подготовки и переработки газа. Моделирование и структурно-параметрическая оптимизация / И.В. Долотовский. – Саратов: Амрит, 2016. – 400 с.