УДК 621.564.25:551.510.534

Г.К. Лавренченко, А.В. Копытин
Украинская ассоциация производителей технических газов «УА-СИГМА», а/я 271, г. Одесса, Украина, 65026
e-mail: uasigma@paco.net

ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МНОГОЦЕЛЕВЫЕ КОМПЛЕКСЫ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ, СОДЕРЖАЩИЕ УГЛЕКИСЛОТНУЮ СТАНЦИЮ, КОГЕНЕРАЦИОННУЮ И ВОЗДУХОРАЗДЕЛИТЕЛЬНУЮ УСТАНОВКИ

Диоксид углерода и азот необходимы для интенсификации нефте- и газодобычи. Их можно получать из дымовых газов, образующихся после сжигания природного газа. Анализ показывает, что более выгодно вначале в когенерационной установке, работающей на природном газе, произвести электроэнергию и теплоту, а потом выделить диоксид углерода и азот. При этом возникают две сложные проблемы: продукты сгорания после когенерационной установки содержат 8-10 % кислорода; потенциал получаемой теплоты оказывается низким. Предложено несколько вариантов решения этих проблем. Это позволило создать автономно и эффективно действующие многоцелевые энерготехнологические комплексы, использующие только природный газ, для выработки электроэнергии, теплоты, жидкого низкотемпературного диоксида углерода и чистого газообразного или жидкого азота. Энерготехнологические комплексы могут включать в свой состав также и криогенные воздухоразделительные установки, что способствует расширению номенклатуры производимых продуктов, в частности, за счёт получаемого жидкого кислорода. В этих комплексах полностью реализуется высокий энергетический потенциал природного газа.
Ключевые слова: *Многоцелевой энерготехнологический комплекс. Природный газ. Электрическая энергия. Теплота. Жидкий низкотемпературный диоксид углерода. Газообразный азот. Жидкий азот. Жидкий кислород. Воздухоразделительная установка. Нефте- и газодобыча.*

G.K. Lavrenchenko, A.V. Kopytin

ENERGOTECHNOLOGICAL MULTI-PURPOSE COMPLEXES ON THE NATURAL GAS, CONTAINING CARBON DIOXIDE STATION, CO-GENERATION AND AIR SEPARATION PLANTS

Carbon dioxide and nitrogen are necessary for an intensification of oil-and gas-extraction. They can be received from the flue gases formed after burning of natural gas. The analysis shows that is more favourable at the beginning in co-generation plant working on natural gas to make the electric power and heat, and then to allocate a carbon dioxide and nitrogen. Thus there are two complex problems: products of combustion after co-generation plant contains 8-10 % of oxygen; the potential of received heat appears low. Some variants for decision this problems are offered. It has allowed to create an independently and effectively working multi-purpose energotechnological complexes using only natural gas, with the purpose of manufacture the electric power, heat, liquid low-temperature carbon dioxide and pure gaseous or liquid nitrogen. Energotechnological complexes allow includes in the structure also an cryogenic air separation plants that promotes the expansion of nomenclature of made products, in particular, liquide oxygen. In these complexes the high energy potential of natural gas is completely realized.
Keywords: *Multi-purpose energotechnological complex. Natural gas. Electric power. Heat. Liquid low-temperature carbon dioxide. Gaseous nitrogen. Liquid nitrogen. Liquid oxygen. Air separation plant. Oil-and gas-extraction.*

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время серьёзное внимание уделяется проблемам энергосбережения и экологии. Особенно актуально это для предприятий, занимающихся добычей нефти и углеводородных газов. В ходе этих работ целесообразно применять диоксид углерода и азот, которые могут использоваться для интенсификации

© *Г.К. Лавренченко, А.В. Копытин*

нефте- и газодобычи. Разработанные нами энерготехнологические комплексы, потребляющие только природный газ, могут одновременно с производством CO_2 и N_2 решать ещё две остро стоящие проблемы обеспечения указанных объектов электрической и тепловой энергией [1-10].

Диоксид углерода целесообразно получать в виде низкотемпературной жидкости. Это позволит его накапливать и хранить длительное время в больших количествах при относительно низких давлениях (0,8...1,5 МПа). С помощью насоса и последующей газификации его можно под давлением до 40 МПа использовать для увеличения нефте- или газодобычи. Кроме этого, жидкий низкотемпературный CO_2 является идеальным средством для пожаротушения и создания инертных сред. С помощью N_2 также можно создавать инертные среды. Его можно ожижить и под требуемым давлением применять для интенсификации указанных процессов.

Анализ показывает, что наиболее эффективно диоксид углерода и азот можно получать из дымовых газов. Диоксид углерода производят из дымовых газов, образованных в основном после сгорания природного газа, методом абсорбции/десорбции с применением растворов моноэтаноламинов. Для обеспечения данного процесса реализуют технологические процессы, связанные как с производством, так и без производства водяного пара, необходимого для обеспечения теплотой процесса десорбции CO_2 из раствора абсорбента.

В таких схемах [12] недостаточно эффективно используют тепловую энергию природного газа. Так как природный газ является высокоэнергетичным топливом, то целесообразнее применить его вначале для производства электроэнергии и теплоты, а затем выделить из дымовых газов газообразные азот и CO_2 для последующего их сжижения [12,13]. Электрическую энергию и теплоту можно вырабатывать в газопоршневых когенерационных установках, потребляющих природный газ [13]. Несомненным преимуществом современных систем когенерации является то, что они могут производить электрическую энергию и теплоту с более высоким комплексным КПД, чем даже существующие крупные тепловые электрические станции.

Однако при создании таких систем возникают две достаточно сложные для решения проблемы: продукты сгорания после когенерационной установки содержат до 8...10 % кислорода; потенциал получаемой теплоты оказывается низким (85...90 °С). Наличие в дымовом газе кислорода не позволяет использовать известные процессы абсорбции/десорбции CO_2 для его извлечения с помощью водных растворов моноэтанол-аминов.

С целью максимального снижения содержания кислорода в дымовых газах или полного его удаления (как следствие — увеличения концентрации CO_2) нами предлагается использовать блок каталитической конверсии природного газа и каталитической очистки дымовых газов от O_2, CO и NO_x [14,15]. Реализация этого позволит одновременно решить проблему повышения потенциала теплоты с производством водяного пара (или без его производства), которая необходима для осуществления процесса десорбции CO_2 из раствора моноэтаноламина.

Производство чистого газообразного азота можно организовать только при условии полного удаления кислорода из дымовых газов и использования блока комплексной очистки и осушки его от следов CO_2 и водяного пара.

Наряду с использованием когенерационной установки, блоков каталитической конверсии природного газа и каталитической очистки удаётся применить двухконтурную паротурбинную установку для утилизации и преобразования произведённой теплоты в электроэнергию [16].

При необходимости избыток электрической мощности, производимой в комплексе, можно использовать для производства жидкого азота, дополнительно оснастив комплекс ожижителем азота. В результате комплекс, потребляя только лишь природный газ, будет автономно производить электрическую и тепловую энергии, жидкий низкотемпературный диоксид углерода и жидкий азот, в чём так нуждаются предприятия, занимающиеся нефте- и газодобычей. Вначале кратко рассмотрим особенности и характеристики необходимого для этого энерготехнологического комплекса, а затем перейдём к анализу показателей комплекса, вырабатывающего жидкие низкотемпературный диоксид углерода и кислород.

2. ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ, ПРОИЗВОДЯЩИЙ ЖИДКИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИОКСИД УГЛЕРОДА И АЗОТ

Принципиальная схема энерготехнологического комплекса, производящего CO_2 и N_2, представлена на рис. 1. Особенность комплекса заключается в том, что для производства азота воздухоразделительная установка не нужна, так как продукты сгорания природного газа после их осушки представляют собой двухкомпонентную смесь CO_2 и N_2. Другая особенность комплекса — производство дополнительного количества электроэнергии в паротурбинной установке (как отмечалось ранее) за счёт утилизации имеющихся в нём тепловых потоков.

На рис. 1 схематично показано подведение теплоты (Q_h) в виде стрелочек от когенерационной установки и углекислотной установки к паротурбинной установке. Благодаря эффективной утилизации всех источников тепловой энергии в ПТУ можно получить дополнительно ещё 30 % электроэнергии. Газообразный азот после этого может предварительно осушаться в адсорбционных блоках осушки и очистки. Приведём в табл. 1 характеристики энерготехнологического комплекса, изображённого на рис. 1, в сравнении его с характеристиками традиционной установки, которая производит только жидкий CO_2 из продуктов сгорания природного газа.

Из данных, представленных в табл. 1, можно заключить, что эффективность энерготехнологического

Таблица 1. *Показатели энерготехнологического комплекса, производящего жидкие CO_2 и N_2*

Наименование	ТУ	ЭК-1
Расход природного газа:	510	510
– в когенерационной установке, м³/ч		306
– в генераторе CO_2, м³/ч		204
Производство электроэнергии:		1950
– в когенерационной установке, кВт		1170
– в паротурбинной установке, кВт		780
Производительность по жидкому диоксиду углерода, кг/ч	1000	1000
Производительность по газообразному азоту, м³/ч		5250[1)]
Производительность по жидкому азоту, кг/ч		850[2)]
Потребление электроэнергии, кВт	340	350[1)] / 1950[2)]
Эксергетический КПД	1,6	41,4[1)] / 6,8[2)]

Примечания: ТУ — традиционная установка; ЭК-1 — энерготехнологический комплекс (CO_2 и N_2); [1)] — режим производства газообразного азота (GN_2); [2)] — режим производства газообразного (GN_2) и жидкого (LN_2) азота.

комплекса выше по сравнению с установкой, в которой используется традиционная схема производства диоксида углерода.

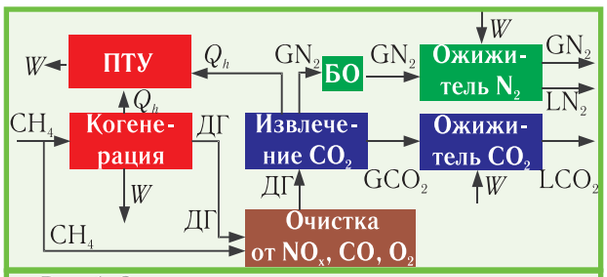

Рис. 1. *Схема энерготехнологического комплекса (ЭК-1), производящего электроэнергию (W), теплоту (Q_h), жидкий диоксид углерода (LCO_2) и газообразный (GN_2) или жидкий азот (LN_2): ПТУ — паротурбинная установка; БО — блок осушки и очистки*

Такие энерготехнологические комплексы обладают способностью интегрироваться в стандартные углекислотные установки. Предлагаемые нами решения можно учесть при создании новых углекислотных станций, которые будут рассчитаны на использование когенерационной и паротурбинной установок.

Энерготехнологический комплекс (см. табл. 1) может производить до 2000 кВт электроэнергии; 1000 кг/ч жидкого низкотемпературного диоксида углерода, 5250 м³/ч чистого газообразного азота или 850 кг/ч жидкого азота. Он характеризуются высоким эксергетическим КПД (более 40 %) и низким эмиссионным эффектом, связанным с производством электрической энергии на месте с полной утилизацией диоксида углерода из продуктов сгорания, что свидетельствует о его высокой энергоэкологической эффективности [17-20]. В данных установках также можно производить CO_2 из дымовых газов, поступающих от внешних источников [20].

Теперь кратко рассмотрим характеристики энерготехнологического комплекса, производящего жидкие низкотемпературный диоксид углерода и кислород.

3. ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ, ПРОИЗВОДЯЩИЙ ЖИДКИЕ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ДИОКСИД УГЛЕРОДА И КИСЛОРОД

В комплексе, представленном на рис. 1, не удаётся производить азот высокой чистоты. Это обусловлено, как минимум, двумя причинами. Первая из них определяется тем, сколько кислорода содержится в дымовом газе, поступающем в абсорбер углекислотной станции, где CO_2 поглощается раствором абсорбента. Кислород, если он имеется в дымовом газе, весь поступает в отводимый из абсорбера азот. Проявление второй причины зависит от степени комплексной очистки азота после абсорбера. Нужно учитывать, что в газообразный азот после сгорания природного газа могут попадать примеси, содержащиеся в исходном газовом топливе.

Поэтому в тех случаях, когда требуется особо чистый газообразный или жидкий азот, его рационально производить с помощью криогенной воздухоразделительной установки. Такой комплекс может найти более широкое применение, чем тот, который нами анализируется.

Также следует учитывать, что в тех случаях, когда природный газ более доступен, чем электроэнергия, комплексы могут с использованием процессов когенерации, кроме жидкого низкотемпературного CO_2, производить жидкие либо азот, либо кислород.

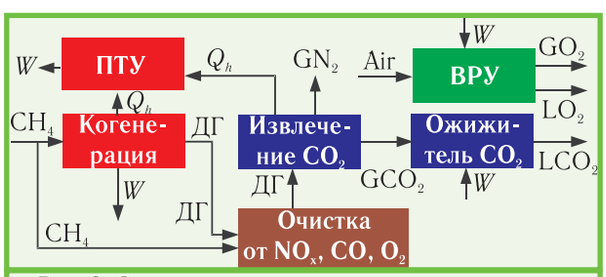

Рис. 2. *Схема энерготехнологического комплекса (ЭК-2), производящего электроэнергию (W), теплоту (Q_h), жидкие диоксид углерода (LCO_2) и кислород (LO_2); Air — воздух, перерабатываемый в ВРУ*

Принципиальная схема энерготехнологического комп-лекса, производящего CO_2 и O_2, представлена на рис. 2. В неё для производства кислорода включена воздухоразделительная установка. Газообразный азот после осушки и очистки от CO_2 может найти применение в качестве инертного газа для продувок оборудования, создания защитных атмосфер, тушения пожаров и др.

Этот энерготехнологический комплекс может найти более широкое применение. Нужно иметь в виду, что жидкие кислород и диоксид углерода являются ликвидными продуктами. Не следует исключать и более простые случаи, когда вместо воздухоразделительной установки (ВРУ) может выступать любое имеющееся технологическое производство, которое нуждается в электрической энергии и теплоте.

Энерготехнологический комплекс, производящий жидкие CO_2 и O_2, работает следующим образом. Из природного газа после его использования в когенерационной установке получают электрическую энергию и теплоту, а из продуктов сгорания производят CO_2 и газообразный N_2. Избытки теплоты дымовых газов и системы охлаждения комплекса утилизируются в паротурбинной установке, которая производит дополнительное количество электроэнергии. Вся выработанная электрическая энергия распределяется между собственными потребителями — воздухоразделительной установкой и углекислотной станцией, обеспечивая автономную работу комплекса. Теплота низкого температурного уровня используется для отопления помещений предприятия.

Приведём в табл. 2 характеристики энерготехнологического комплекса, изображённого на рис. 2. Он сравнивается с показателями традиционной установки, которая производит только жидкий CO_2 из продуктов сгорания природного газа.

Из данных, представленных в табл. 2, можно заключить, что эффективность энерготехнологического комплекса в 5 раз больше по сравнению с установкой, реализующей традиционную схему производства диоксида углерода.

Энерготехнологический комплекс ЭК-2, потребляя только природный газ в количестве 510 м^3/ч, может автономно производить до 2000 кВт электроэнергии; 1000 кг/ч жидкого низкотемпературного диоксида углерода, 5250 м^3/ч газообразного азота и 1000 кг/ч жидкого кислорода.

В тех случаях, когда многорежимная ВРУ в составе комплекса вырабатывает особо чистый жидкий азот вместо жидкого технического кислорода, его эффективность мало отличается от указанной в табл. 2.

Для оценки эффективности энерготехнологических комплексов будем принимать за целевые продукты производимые жидкие CO_2, N_2, O_2 и электроэнергию при прочих одинаковых условиях. Их эксергетические КПД в соответствии с упрощённой схемой эксергетического баланса, изображённой на рис. 3, указаны в табл. 3 с учётом данных таблиц 1 и 2.

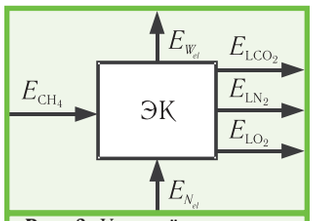

Рис. 3. *Упрощённая схема основных эксергетических потоков энерготехнологического комплекса: E_{CH_4}, E_{Nel}, E_{Wel}, E_{LCO_2}, E_{LN_2}, E_{LO_2} — эксергии, соответственно, исходного топлива — метана, потребляемой и производимой электроэнергии, жидких CO_2, N_2 и O_2*

Из табл. 3 следует, что наибольшим эксергетическим КПД (41 %) будет располагать энерготехнологический комплекс (ЭК), производящий жидкий низкотемпературный диоксид углерода и электроэнергию. Полезное же использование электроэнергии внутри комплекса для производства жидкого азота (ЭК-1) или кислорода (ЭК-2), как продуктов, приведёт к снижению эксергетического КПД в среднем до 5 %. В случаях различных вариантов производства и выдачи частично газообразных или жидких продуктов, а также электроэнергии эксергетическая эффективность энерготехнологического комплекса будет изменяться от 5 до 41 % и зависеть от конкретных требований заказчика.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание автономно и эффективно действующих многоцелевых энерготехнологических комплексов, потребляющих только природный газ, с целью выработки электроэнергии, теплоты, жидкого низкотемпературного диоксида углерода и газообразного азота — перспективное направление в энергетике, нефте- и газодобывающей промышленности. Такие комплексы позволяют полностью использовать значительный энергетический потенциал природного газа; обеспечить высокую степень утилизации произведённой теплоты; произвести дополнительный продукт — чистый газообразный или жидкий азот; снабдить потребителя собственной элект-

Таблица 2. *Показатели энерготехнологического комплекс, производящего жидкие CO_2 и O_2*

Наименование	ТУ	ЭК-2
Расход природного газа:	510	510
– в когенерационной установке, м^3/ч		306
– в генераторе CO_2, м^3/ч		204
Производство электроэнергии:		1950
– в когенерационной установке, кВт		1170
– в паротурбинной установке, кВт		780
Производительность по диоксиду углерода, кг/ч	1000	1000
Производительность по газообразному азоту, м^3/ч		5250
Производительность по жидкому кислороду, кг/ч		1000
Потребление электроэнергии, кВт	340	1950
Эксергетический КПД	1,6	8,2

Примечания: ТУ — традиционная установка; ЭК-2 — энерготехнологический комплекс (CO_2 и O_2).

Таблица 3. *Значения эксергетических КПД*

Наименование	LCO_2, кг/ч	LN_2, кг/ч	LO_2, кг/ч	N_{el}, кВт	W_{el}, кВт	η_e, %
ТУ	1000			340		1,6
ЭК	1000				1600	41,0
ЭК-1 (рис. 1)	1000	850				4,7
ЭК-2 (рис. 2)	1000		1000			5,3

Примечания: ТУ — традиционная установка; ЭК, ЭК-1, ЭК-2 — энерготехнологические комплексы, производящие, соответственно, LCO_2 и W_{el}, LCO_2 и LN_2, LCO_2 и LO_2; N_{ei} — потребляемая ТУ мощность.

роэнергией, теплотой; развить инфраструктуру предприятия; интенсифицировать нефте- и газодобычу.

При учёте приблизительной оценочной стоимости таких комплексов (ЭК-1 и ЭК-2), которые электроэнергию, жидкие низкотемпературный диоксид углерода и азот продавали бы потребителям или использовали для собственных нужд, срок их окупаемости составит от 2 до 3 лет, что является убедительным показателем их высокой рентабельности.

Указанные сроки окупаемости затрат на создание энерготехнологических комплексов могут быть существенно снижены. На это могут повлиять два обстоятельства, которые проявляют себя по-разному. Во-первых, следует учесть, что при расчётах нами учитывалась относительно высокая стоимость природного газа, по которой он поставляется в Украине на предприятия общепромышленного назначения. При использовании комплексов в регионах газодобычи стоимость газа будет близка к его себестоимости. Во-вторых, в расчёты необходимо вводить экономический эффект, обусловленный ростом нефте- и газодобычи от применения продуктов, производимых с помощью энерготехнологических комплексов.

Разработанные энерготехнологические комплексы при использовании природного газа в количестве 510 м^3/ч и прочих одинаковых условиях могут производить 1000 кг/ч жидкого низкотемпературного диоксида углерода, 850 кг/ч жидкого азота или 1000 кг/ч жидкого кислорода в зависимости от схемы реализации комплекса. Уникальность комплекса заключается в возможности его интегрирования в любой технологический процесс производства.

Следует отметить, что эксергетический КПД энерготехнологического комплекса в 3 раза выше при автономном производстве жидких продуктов — азота или кислорода и более чем в 20 раз больше при производстве электроэнергии и газообразного азота по сравнению с традиционными установками, вырабатывающими только жидкий диоксид углерода.

Таким образом, применяя только природный газ с дополнительной выработкой тепловой и электрической энергии, можно получать такие востребованные продукты как жидкий низкотемпературный диоксид углерода и чистый газообразный или жидкий азот, которые нужны для организации процессов нефте- и газодобычи. Разработанные комплексы являются экологически чистыми и не имеют выбросов в атмосферу CO_2, вредных примесей, что не вызовет необходимости внедрения сложного менеджмента CO_2.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дункан Г.** Методы увеличения нефтеотдачи: практика проектирования, закачивания и эксплуатации скважин// Нефтегазовые технологии. — 1995. — № 2. — С. 1-16.

2. **Дункан Г.** Реализация методов увеличения нефтеотдачи: проектирование, закачивание, добыча// Нефтегазовые технологии. — 1995. — № 3. — С. 7-11.

3. **Дункан Г.** Реализация методов увеличения нефтеотдачи: практика проектирования, закачивания и эксплуатации скважин// Нефтегазовые технологии. — 1995. — № 6. — С. 7-16.

4. **Дункан Г., Стемплер Ф.** Реализация методов увеличения нефтеотдачи: практика проектирования, закачивания и эксплуатации скважин// Нефтегазовые технологии. — 1996. — № 4. — С. 25-29.

5. Применение азота и дымовых газов для повышения нефтеотдачи пластов// Методы извлечения остаточной нефти. — М.: Недра, 1991. — 326 с.

6. **Шоу Т.П., Хаджис П.У.** Оптимизация удаления CO_2// Нефтегазовые технологии. — 2001. — № 5. — С. 117-119.

7. Газы, вызывающие парниковый эффект, и нефтеперерабатывающая промышленность// Коротко о разном // Нефтегазовые технологии. — 1998. — № 1. — С. 51.

8. **Дакетт М., Бенкс Р., Лимб Д.** Использование азота для увеличения добычи нефти и газа// Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1983. — № 7. — С. 37-40.

9. **Клэнси Дж.П., Кролл Д.Э., Гилкрист Р.Е.** Применение азота для увеличения добычи нефти и природного газа// Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1981. — № 10. — С. 43-48.

10. **Клименко А.П.** Сжиженные углеводородные газы. — М.: Недра, 1974. — 368 с.

11. **Пименова Т.Ф.** Производство и применение сухого льда, жидкого и газообразного диоксида углерода. — М.: Лёгкая и пищевая пром-сть, 1982. — 208 с.

12. **Лавренченко Г.К., Копытин А.В.** Эффективность производства газообразного диоксида углерода и азота из дымовых газов с использованием процессов абсорбции-десорбции// Технические газы. — 2004. — № 3. —С. 12-22.

13. **Лавренченко Г.К., Копытин А.В.** Повышение эффективности комплексов для производства жидкого диоксида углерода и газообразного азота из дымовых газов// Химическое и нефтегазовое машиностроение. — 2004. — № 5. — С. 19-22.

14. Справочник азотчика в двух томах. Том 1. Под ред. **Е.Я. Мельникова.** — М.: Химия, 1967. — 492 с.

15. Справочник азотчика в двух томах. Том 2. Под ред. **Е.Я. Мельникова.** — М.: Химия, 1967. — 444 с.

16. Применение двухконтурных паротурбинных энергоустановок на низкокипящих рабочих телах в условиях геотермальных месторождений Украины/ **А.А. Долинский, В.Н. Клименко, Б.Д. Билека и др.**// Промышленная теплотехника. — 2000. — № 3. — С. 30-42.

17. United Nations on Climate Change. Global Warming General Convention. — Kyoto, 1997. — 8 p.

18. **Лавренченко Г.К., Копытин А.В.** Энерготехнологические комплексы на природном газе с когенерационной и паротурбинной установками для производства электрической энергии, жидкого диоксида углерода и газообразного азота// Технические газы. — 2005. — № 2. — С. 11-21.

19. **Лавренченко Г.К., Копытин А.В.** Энерготехнологические комплексы на природном газе с когенерационной установкой и тепловым насосом для производства электриче-ской энергии, жидкого диоксида углерода и газообразного азота// Технические газы. — 2005. — № 3. — С. 15-24.

20. **Лавренченко Г.К., Копытин А.В.** Повышение эффективности производства жидкого диоксида углерода// Технические газы. — 2007. — № 4. — С. 29-36.