

УДК 621.592.3

Г.К. ЛавренченкоУкраинская ассоциация производителей технических газов «УА-СИГМА», а/я 271, г. Одесса, Украина, 65026
e-mail: uasigma@paco.net**ВКЛАД ПРОФЕССОРА А.П. КЛИМЕНКО И ЕГО ШКОЛЫ
В СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЙ**

Интерес к различным энерготехнологиям, в которых в том или ином виде участвуют горючие газы, постоянно растёт. Работы в области разработки и совершенствования углеводородных энерготехнологий проводятся в Институте газа НАН Украины с момента его создания. Значительный вклад в их развитие был внесён А.П. Клименко и его научной школой. Рассматриваются основные работы этого профиля, выполненные под руководством А.П. Клименко. Анализируются особенности разработанного им однопоточного каскадного криогенного цикла для ожижения природного газа. Этот цикл широко используется многими компаниями для создания эффективных установок.

Ключевые слова: Углеводороды. Природный газ. Сжижение. Разделение углеводородных газов. Однопоточный каскадный криогенный цикл. Смеси газов. Биогаз. Энерготехнологии.

G.K. Lavrenchenko**CONTRIBUTION OF PROFESSOR A.P. KLEEMENKO AND HIS SCHOOL
INTO CREATION OF SCIENTIFIC BASES OF HYDROCARBON ENERGY TECHNOLOGIES**

Interest to various energy technologies in which in this or that kind take part a burning gases is constantly grows. Works in the field of creation and perfection of hydrocarbon energy technologies are carried out in Institute of Gas NAS of Ukraine from the moment of its creation. The significant contribution to their development has been brought by A.P. Kleemenko and his scientific school. The basic works of this structure executed under the guidance of A.P. Kleemenko are considered. Features of the one flow cascade cryogenic cycle developed by him for liquefaction of natural gas are analyzed. This cycle is widely used by many companies for creation of effective plants.

Keywords: Hydrocarbons. Natural gas. Liquefaction. Hydrocarbon gases separation. One flow cascade cryogenic cycle. Gases mixtures. Biogas. Energy technology.

1. ВВЕДЕНИЕ

В этом году отмечается 60-летний юбилей широко известного среди специалистов различных стран Института газа НАН Украины. Как указывается в [1], он был создан в составе Академии наук УССР в 1949 г.

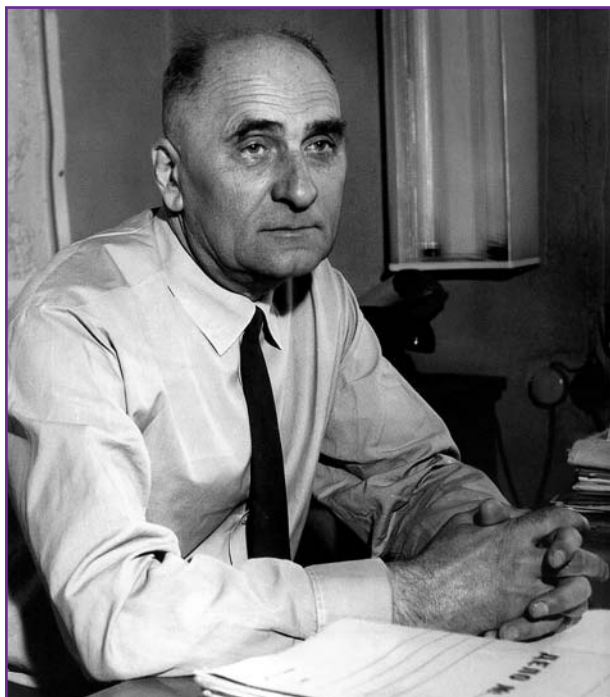
«Необходимость организации Института, — отмечается в [1], — диктовалась практически полным отсутствием как опыта, так и технических решений по рациональному и эффективному использованию природного газа в народном хозяйстве, а также сложными задачами дальнейшего развития газовой промышленности и газификации страны, которые должны были решаться на научной основе. Сам факт создания такого института в системе Академии наук свидетельство-

вал об основательном отношении к проблеме со стороны руководства государства и понимании того, что эта проблема имеет межотраслевой и долгосрочный характер» [1].

По мере становления Института и укрепления его кадрового состава были начаты и продолжали развиваться целенаправленные фундаментальные, а также прикладные научные исследования. Для их выполнения в Институте создавались различные коллективы. Охарактеризовать проводимые в то время достаточно актуальные исследования сложно в рамках данной статьи. Поэтому из всего многообразия исследований выделим только те, которые выполнялись рядом сотрудников с участием и под руководством д.т.н., профессора А.П. Клименко, сформировавшего научные основы углеводородных энерготехнологий.

2. ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ МИРА УГЛЕВОДОРОДОВ

А.П. Клименко в сентябре 1949 г. был принят в институт на должность инженера. Здесь он выполнил и защитил кандидатскую (1955 г.) и докторскую (1964 г.) диссертации. Им в течение многих лет возглавлялся отдел разделения и очистки газовых смесей (фото 1).



*Фото 1. Д.т.н., профессор
Александр Петрович Клименко*

На начальном этапе работ А.П. Клименко поднимались вопросы использования перепадов давлений газа на ГРС для выработки электроэнергии и получения холода, применения природного газа в качестве моторного топлива для транспортных средств, получения сжиженного природного газа (СПГ) как эффективного альтернативного топлива. В эти же годы много внимания он уделял изучению и описанию равновесных и транспортных свойств алканов, алкенов и других веществ. Изданный под редакцией А.П. Клименко атлас термодинамических диаграмм наиболее важных для промышленности углеводородов стал ценным пособием для специалистов газовой отрасли.

А.П. Клименко принадлежит постановка, организация и выполнение работ в области исследования термодинамических свойств углеводородов, сжижения и разделения газов [1]. Системы углеводородов представляют собой исключительно сложные для описания термодинамические объекты. Основные теоретические положения и методы расчётов, применяемые при нахождении параметров чистых веществ, невозможно было перенести на многокомпонентные смеси углеводородов, осложнённые наличием в них азота, диоксида углерода, сероводорода, влаги и других сопутствующих веществ. К тому же, процессы, реализуемые в этих системах, часто протекают в двух- и многофазных

областях. В них наблюдаются различные эффекты, которые не проявляются в чистых веществах. Например, в бинарной смеси метан-пропан можно в изотермических условиях, изменяя давление, переходить из одной точки росы к другой (процесс ретроградной конденсации) [2]. В некоторых условиях удаётся изобарически, изменяя температуру, осуществлять аналогичный переход из одной точки кипения к другой (ретроградное кипение). С этими и более сложными явлениями пришлось столкнуться А.П. Клименко и его сотрудникам при создании методов термодинамического описания свойств многокомпонентных систем, содержащих углеводороды.

На основе исследований свойств углеводородных смесей и разработки машинных методов расчёта были созданы базы данных для описания газовых и газоконденсатных месторождений. Они и до настоящего времени используются рядом организаций при проектировании установок фракционирования углеводородов и технологических комплексов газоперерабатывающих заводов. Дальнейшее совершенствование и расширение базы данных, а также использование современного программного обеспечения позволило О.В. Калашникову — ученику А.П. Клименко — создать программы расчёта термодинамических свойств и процессов в разнообразных многокомпонентных смесях, содержащих широкий ряд углеводородов. Комплекс этих программ, получивших название ГазКондНефть, — один из лучших в мире.

Научная деятельность А.П. Клименко в институте была ориентирована на решение теоретических и практических вопросов применения глубокого охлаждения в процессах сжижения и разделения углеводородных газов. Для этого выполнялись экспериментальные исследования, математическое описание и моделирование процессов теплообмена, осуществлялся термодинамический анализ процессов переработки углеводородных смесей с целью оптимизации их параметров.

Под его руководством сотрудниками отдела были выполнены следующие основные работы:

1. Проведена экспериментальная проверка на лабораторных и полупромышленных установках оптимальных параметров различных циклов сжижения природного газа.

2. Разработана теория, методы расчёта и экспериментально исследованы характеристики детандеров при их работе на смесях углеводородов.

3. Проведено исследование и выданы рекомендации по улучшению показателей схемы Московского завода сжижения природного газа. Результаты работ подтверждены на опытной установке института, которую затем использовали для обучения специалистов завода.

4. Предложен, разработан и исследован однопоточный каскадный цикл глубокого охлаждения, который был принят за основу при проектировании завода сжижения природного газа в Армении.

5. Предложен и разработан метод фиксирования составов высокотемпературных реакций получения

ацетилена, этилена и окислов азота путём закалки их адиабатическим расширением и последующим охлаждением в отрезки времени порядка 10^{-4} - 10^{-5} с.

6. Разработана и построена совместно с предприятиями Министерства авиационной промышленности серия воздушных холодильных машин с турбодетандерами производительностью 5,8-23,2 кВт на температурном уровне до -100 °С для испытания приборов и элементов авиационной техники в условиях низких температур и вакуума. Аналогичная установка была сооружена для научного центра, находящегося в Дубне.

7. Для больших установок сжижения и разделения углеводородных газов А.П. Клименко был предложен принцип замены теплообмена через стенку контактным с использованием промежуточных жидких хладоносителей, которые могут являться также селективными абсорбентами некоторых компонентов, например, H_2O , CO_2 , и ингибиторами гидратообразования. Для реализации этого принципа были подобраны и исследованы в лабораторных и полупромышленных установках хладоносители для различных температурных уровней. Высокая эффективность принципа была подтверждена в ходе лабораторных полупромышленных и промышленных испытаний схем разделения с жидкими хладоносителями попутных газов, глубокой осушки и очистки природных газов и пирогаза, межступенчатого охлаждения пирогаза в компрессорах. Схемы с жидкими хладоносителями и селективными абсорбентами позволяют совместить несколько процессов в одном аппарате, например, охлаждение, глубокую осушку, очистку и извлечение целевых компонентов. В них оказывается возможным осуществлять контактный теплообмен с температурными разностями на холодном конце аппарата до 1 °С. Эксперименты и проектная проработка показали, что применение жидких хладоносителей в крупных и мелких установках газоразделения снижает энергозатраты на 25-35 % и капиталовложения на 30-40 %. Этот принцип использован при создании передвижного газобензинового завода в Елабуге (Татарстан), при реконструкции этиленовой установки на химкомбинате в Грозном, при разработке установки разделения крекинг-газов в Бориславе, на опытно-промышленных установках выделения этана, пропана, бутанов.

8. Проведены теоретические и экспериментальные исследования процессов регазификации сжиженных газов. Разработаны методики расчёта процессов и аппаратов. Отделом предлагалось и обосновывалось транспортирование больших количеств СПГ по криогенным трубопроводам на большие расстояния. В местах потребления СПГ целесообразно было с целью возврата части работы ожижения вырабатывать энергию в цикле, где окружающая среда являлась верхним источником, а газифицируемый СПГ — нижним.

9. Выполнено теоретическое и экспериментальное исследование процессов неадиабатической ректификации углеводородных смесей в трубчатых колонных аппаратах. Показана возможность снижения энергозатрат на 20-25 % при разделении смесей близкикопьящих компонентов, таких как пропан-про-

пилен, норм. бутан-изобутан и др.

10. Проведено теоретическое и экспериментальное исследование процессов тепло- и массообмена при конденсации и испарении смесей, абсорбции и химических реакциях применительно к технологии процессов подготовки и переработки углеводородов.

11. Разработаны методики и алгоритмы расчёта процессов химической технологии на основе решения конечно-разностными методами систем дифференциальных уравнений.

Научное наследие А.П. Клименко исключительно богато и масштабно. Им опубликованы 12 монографий [3-10], из которых [3] и [4] выдержали по два издания, а [5] — три. К этому следует приобщить более 300 опубликованных статей, большое количество авторских свидетельств на изобретения.

Многие исследования А.П. Клименко получили дальнейшее развитие в работах его учеников. Широко востребованным оказался предложенный им однопоточный каскадный цикл. Рассмотрим, как развивались исследования характеристик данного цикла, как он модифицировался и совершенствовался.

3. ОДНОПОТОЧНЫЙ КАСКАДНЫЙ ЦИКЛ А.П. КЛИМЕНКО

Термодинамические аспекты разработанного А.П. Клименко эффективного цикла для ожижения природного газа впервые были освещены им в докладе, с которым он выступил в 1959 г., т.е. 50 лет назад, на X-ом конгрессе Международного института холода (Дания, Копенгаген) [11].

Укажем место однопоточного каскадного цикла среди возможным циклов на смесях веществ.

Следует отметить, что для ожижения природного газа можно применять две модификации цикла (см. рис. 2): на многокомпонентных смесях с внешним холодильным циклом и с так называемым однопоточным циклом. В схеме, изображённой на рис. 2,а, путём подбора соответствующих составов смесей, интервалов охлаждения в рекуперативных теплообменниках I-IV и расходов через дроссельные вентили Др1-Др3, можно обеспечить практически любой характер производства холода и высокую эффективность ожижения в целом. Недостаток схемы — необходимость применения двух компрессоров, наличие эксергетических потерь при охлаждении потока ожижаемого газа в рекуперативных теплообменниках при конечных разностях температур и потребность в специально сформированной для рассматриваемых целей многокомпонентной смеси. А.П. Клименко доказал, что для устранения указанных недостатков и дальнейшего снижения затрат на ожижение природного газа необходимо объединить прямой и ожижаемый потоки в один общий, как показано на рис. 2,б.

Отдел разделения и очистки газовых смесей разработал методику расчёта однопоточного каскадного цикла. При этом изучались более сложные и эффективные холодильные трёхпоточные каскадные циклы для получения СПГ. В институте была изготовлена пи-

лотная установка для производства 150 кг/ч СПГ, реализующая однопоточные каскадные циклы ожижения природного газа. В ней использовался, к сожалению, неподходящий для этого компрессор, изотермический КПД которого не превышал 0,45. Несмотря на это, удельные затраты составляли 0,9 кВт·ч/кг СПГ, что являлось относительно неплохим показателем с учётом низкой эффективности компрессора и невысокой производительности установки. Данные, полученные в ходе разработки и испытаний пилотной установки, легли в основу создаваемого завода по производству СПГ, который планировалось построить в Армении для энергообеспечения многих негазифицированных регионов республики.

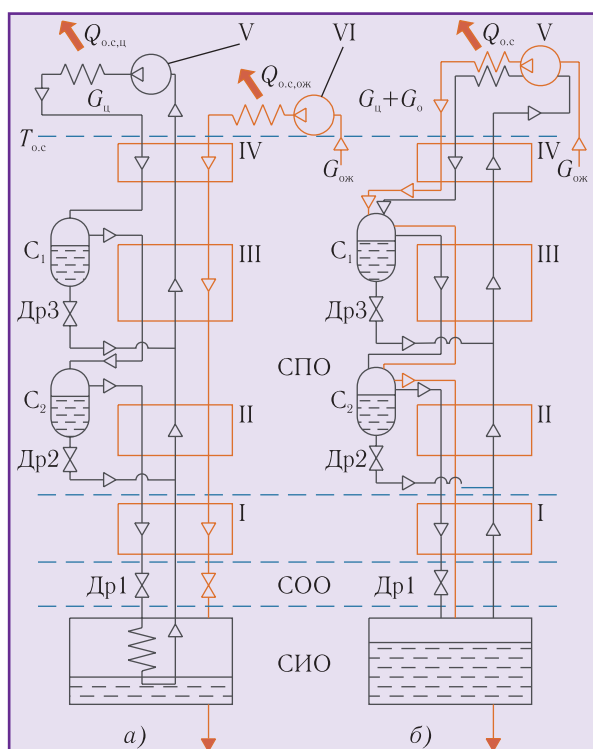


Рис. 2. Схемы ожижителей природного газа с производством холода в циклах на многокомпонентных смесях [12] с разделными (а) и совместными потоками (однопоточный каскадный цикл) (б): I-IV — рекуперативные теплообменники; V — компрессоры, работающие на смесях; VI — компрессор для компримирования ожижаемого природного газа; C₁, C₂ — сепараторы сред; Др1-Др3 — дроссельные вентили; СПО — ступень предварительного охлаждения; СОО — ступень окончательного охлаждения; СИО — ступень использования охлаждения

Однопоточный каскадный цикл сейчас уже можно отнести к классике криогенной техники — он вошёл в различные учебники, например, в [12]. Его стали использовать для создания экономичных крупнотоннажных систем производства СПГ. Одно из первых таких производств было сооружено в Алжире для обеспечения сжиженным природным газом экспортного терминала [13].

Широко использует однопоточный каскадный

цикл на многокомпонентных смесях для создания эффективных ожижителей природного газа компания «Linde AG» [14]. Такой вывод можно сделать из рис. 3. Из него следует, что установки с однопоточным каскадным циклом являются основными типами ожижителей природного газа. Такие системы имеют существенно более высокие производительности по сравнению с другими СПГ-установками. Приведём характеристики только двух крупных установок.

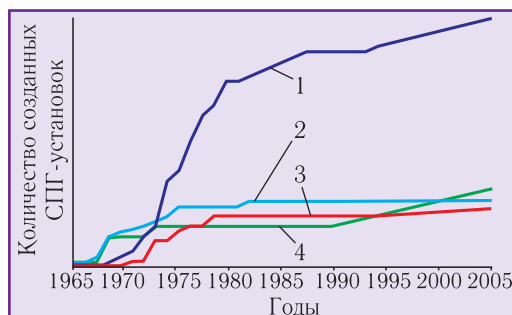


Рис. 3. Тенденции в использовании термодинамических циклов: 1 — с однопоточным каскадным циклом на многокомпонентных смесях оптимального состава; 2 — с каскадным охлаждением и дросселированием природного газа; 3 — с предварительным охлаждением пропаном и расширением в детандере; 4 — с двухкаскадным охлаждением и дросселированием природного газа



Фото 4. Комплекс с СПГ-установкой в Моссель Бей

На фото 4 показан внешний вид комплекса с СПГ-установкой в Моссель Бей (ЮАР). Она производит 745 кмоль/ч СПГ, объём его хранения 10000 м³. СПГ при необходимости подаётся на крупный нефтехимический завод в виде газа (производительность газификатора 9250 кмоль/ч) в тех случаях, когда прекращается подача добываемого газа из-за аварий на находящихся в море установках. Таким образом, эта установка применяется для резервирования СПГ и покрытия пиковых потребностей в природном газе. Ряд СПГ-установок строится компанией для заправки СПГ специализированных судов, железнодорожных цистерн, криогенных полуприцепов и контейнеров. На фото 5 изображён комплекс, построенный в Китае (месторождение Туха, г. Чан Чан, провинция Хин-



Фото 5. Комплекс сжижения природного газа, сооружённый «Linde AG» в китайской провинции Хин-Янг

Янг). Его производительность — 2800 кмоль СПГ/ч, объём хранения — 30000 м³ СПГ.

Однопоточный каскадный цикл ожижения используется известной компанией ОАО «Криогенмаш» (г. Балашиха Московской области) в разработках перспективного оборудования: криогенный комплекс переработки попутных нефтяных газов [15]; СПГ-установка, входящая в состав АГНКС [16].

На основе цикла А.П. Клименко можно создавать и рефрижераторные установки [17]. Модифицированный цикл Клименко был применён нами при разработке эффективной микрокриогенной системы на уровень азотных температур. В ней в качестве хладагента использовалось многокомпонентное рабочее тело оптимального состава на основе азота и ряда углеводородов [18].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Институт газа НАН Украины по праву гордится научными школами выдающихся учёных, которые оставили глубокий след в его деятельности и стояли у истоков его создания: *Н.Н. Доброхотова, В.Ф. Копытова, Н.А. Захарикова*.

К таким научным образованиям специалистов относится и школа А.П. Клименко: *Б.Я. Максимчук, А.Г. Чегликов, А.И. Пятничко, С.И. Краснооккий, О.В. Калашников, В.Л. Сапрыкин* [1]. Они развивают и углубляют исследования, которые проводились в прошлые годы большим научным коллективом под руководством А.П. Клименко.

Несмотря на то, что в последние годы созданы и успешно заявили о себе научные школы уже учеников указанных выдающихся учёных и педагогов, например, школы *И.Н. Карпа* и *Б.И. Бондаренко*, школа А.П. Клименко «не растворилась», не ушла в небытие, а продолжает эффективно функционировать.

Ассоциация поддерживает тесные научные связи с ведущими специалистами Института газа НАН Украины. Для нас престижно, что Институт является корпоративным членом Ассоциации. Нами ведутся

совместные исследования с А.И. Пятничко и коллективом его сотрудников. Имеются хорошие результаты, публикации и разработки. В ходе исследований используем уникальный комплекс программ «ГазКонд-Нефть». Он постоянно совершенствуется О.В. Калашниковым, существенно расширяются его возможности.

Одно из направлений исследований, которые ведутся с участием и под руководством А.И. Пятничко, очень актуально и перспективно. Научный коллектив занимается разработкой технологий производства, переработки и эффективного использования генераторного газа и биогаза, получаемых из возобновляемых сырьевых источников [19,20]. У этих исследований и создаваемых на их основе оборудования и технологий большое будущее. Потенциал таких источников задействован, например, в Норвегии на 99 %, в Швеции — 77 %. В Украине же — всего на 3 % и то за счёт вклада гидроэнергетики в этот скромный показатель [21].

Сложно охарактеризовать все работы, которые ведутся в Институте газа НАН Украины в области создания и внедрения эффективных энерготехнологий. Их немало, ими успешно занимаются различные коллективы института. Этим исследованиям уделяется большое внимание, так как проблема энергосбережения и энерготехнологий является для Украины государственным приоритетом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карп И.Н.** Институту газа Национальной академии наук Украины 50 лет// Экотехнологии и ресурсосбережение. — 1999. — № 3. — С. 3-9.
2. **Сейдж Б.Х.** Термодинамика многокомпонентных систем. — М.: Изд-во «Недра», 1969. — 304 с.
3. **Клименко А.П.** Жидкие углеводородные газы. — М.: Гостоптехиздат, 1959. — 295 с.
4. **Клименко А.П.** Получение этилена из нефти и газа. — М.: Гостоптехиздат, 1962. — 236 с.
5. **Клименко А.П.** Сжиженные углеводородные газы.

Хранение, транспортировка, регазификация и использование. — 2-е изд., доп. и перераб. — М.: Гостоптехиздат, 1962. — 420 с.

6. Клименко А.П. Разделение природных углеводородных газов. — К.: Техника, 1964. — 377 с.

7. Клименко А.П., Каневец Г.Е. Расчёт теплообменных аппаратов на электронных электрических машинах. — М.-Л.: Энергия, 1966. — 271 с.

8. Холод в машиностроении/ Под. ред. д.т.н. А.П. Клименко. — М.: Машиностроение, 1969. — 248 с.

9. Клименко А.П. Сжиженные углеводородные газы. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Гостоптехиздат, 1974. — 367 с.

10. Клименко А.П. Клатраты (гидраты газов). — К.: Наукова думка, 1989. — 76 с.

11. Клеменко А.Р. One flow cascade cycle (in schemes of natural gas liquefaction and separation)/ Proc. of 10th Int. Congr. of Refr. — Denmark: Copenhagen, 1959. — P. 1-a-6.

12. Бродянский В.М., Семёнов А.М. Термодинамические основы криогенной техники. — М.: Энергия, 1980. — 448 с.

13. Инфраструктура использования сжиженного природного газа: проблемы и перспективы/ Ю.А. Похил, В.Т. Архипов, Г.Д. Гомуля, А.Я. Левин// Технические газы. — 2006. — № 4. — С. 45-54.

14. Зайцев Ю.В., Лавренченко Г.К. Опыт создания СПГ-установок различного назначения// Технические газы.

— 2007. — № 2. — С. 48-55.

15. Применение криогенных СПГ-технологий в переработке попутных нефтяных газов/ Ю.В. Горбатский, В.А. Передельский, А.Л. Довбиш и др.// Технические газы. — 2006. — № 3. — С. 22-27.

16. Эффективная установка сжижения природного газа на базе АГНКС с использованием «открытого цикла Клименко»/ И.Ф. Кузьменко, А.Л. Довбиш, Р.В. Дарбинян и др.// Технические газы. — 2006. — № 4. — С. 25-28.

17. Бродянский В.М., Грезин А.К. Повышение эффективности низкотемпературных холодильных машин// Холодильная техника. — 1973. — № 3. — С. 1-6.

18. Лавренченко Г.К. Разработка микрокриогенной системы на многокомпонентном рабочем теле, реализующей модифицированный цикл Клименко// Технические газы. — 2009. — № 5. — С. 21-25.

19. Крушневич Т.К., Пятничко А.И. Извлечение метана из биогаза полигонов и подача его в магистральный газопровод// Технические газы. — 2006. — № 3. — С. 41-43.

20. Разработка технологических комплексов для производства моторных газовых топлив из генераторного газа/ Е.И. Сухин, А.И. Пятничко, Т.К. Крушневич, Г.К. Лавренченко, А.В. Копытин// Технические газы. — 2008. — № 2. — С. 22-30.

21. Украина использует лишь 3 % возобновляемой энергии// Діловий вісник. — 2008. — № 1 (164). — С. 19.






IG,China'2009
11th China International Exhibition on
Gases Technology, Equipment and Application

www.igchina-expo.com



LNG 2009
China International Exhibition on Liquid
Natural Gas, Gas Fueling Stations & Hydrogen
Energy Technology Equipment and Application

www.lng-expo.com

Dates: September 23rd – 25th, 2009

Venue: Beijing National Agriculture Exhibition Center, China

Organizer: China Industrial Gases Industry Association 

National Co-organizers:

Chinese Association of Refrigeration	CNOOC Gas & Power Group
China City Gas Association	Shanghai Jiao Tong University Development Center of LNG and Clean Energy
SYSU-BP Center for LNG Education, Training and Research in Zhong Shan University	

International Co-organizers:

Korea High Pressure Gases Cooperative Union	Korea Gas Safety Corporation
Ukrainian Association of Manufactures of Industrial Gases	
All India Industrial Gases Manufacturers' Association	Hydrogen Energy System Society of Japan
Fuel Cell Development Information Center of Japan	

Producer:
China Industrial Gases Industry Association-Department of International Relations - AIT Events Co., Ltd.

For bookings and further details, Please contact the Sale's Team
China Industrial Gases Industry Association-Department of International Relations
- AIT Events Co., Ltd.

Mr. Jeffrey Wang, Mr. Mark Liu, Mr. Kelvin Leng
E-mail: ig.china@ait-events.com

Tel: (86-10)8586 8930-231、207、204
Fax: (86-10)8586 8931

