

УДК 629.12:621.57

А.А. Вассерман, В.П. Мальчевский

Одесский национальный морской университет, ул. Мечникова, 34, г. Одесса, Украина, 65029

e-mail: avas@paco.net

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛА ОДНОСТУПЕНЧАТОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОТЕ НА СМЕСЯХ R23/R744 И R41/R744

Проанализировано термодинамическое поведение смесей R23/R744 и R41/R744 в состоянии насыщения. Установлено, что разность температур насыщенных пара и жидкости на изобарах для четырёх значений состава не превышает 2 К. Представлены зависимости этой разности температур от давления и температуры в интервалах от 0,1 до 5,5 МПа и от 185 до 310 К. Рассчитаны характеристики цикла одноступенчатой холодильной машины при использовании указанных смесей как рабочих тел.

Ключевые слова: Смесей R23/R744 и R41/R744. Термодинамическое поведение. Состояние насыщения. Холодильная машина. Характеристики цикла.

A.A. Vasserman, V.P. Malchevskiy**CHARACTERISTICS OF CYCLE OF ONE-STEP REFRIGERATING MACHINE WORKING ON MIXTURES R23/R744 AND R41/R744**

The thermodynamic behavior of mixtures R23/R744 and R41/R344 at saturation state was analysed. It was established that the difference of temperatures of saturated vapor and liquid on isobars for four values of composition not exceed 2 K. The dependences of these temperatures' difference from pressure and temperature are presented in intervals from 0,1 up to 5,5 MPa and from 185 to 310 K. The characteristics of cycle of one-step refrigerating machine using mentioned mixtures as working media were estimated.

Keywords: Mixtures R23/R744 and R41/R744. Thermodynamic behavior. Saturation state. Refrigerating machine. Characteristics of cycle.

1. ВВЕДЕНИЕ

Бинарные смеси альтернативных хладагентов R23 и R41 с диоксидом углерода R744 — перспективные рабочие вещества холодильных машин. Температуры затвердевания этих смесей ниже, чем у чистого диоксида углерода; потенциал глобального потепления смеси R23/R744 меньше, чем у R23, а смесь R41/R744 не воспламеняется (в отличие от R41).

На основании экспериментальных p, ρ, T, x -данных нами составлены уравнения состояния бинарных смесей хладагентов R23 и R41 с диоксидом углерода [1,2]. По этим уравнениям с помощью автоматизированной системы [3] рассчитаны термодинамические свойства указанных смесей. На основании полученных данных о свойствах исследовано термодинамическое поведение смесей R23/R744 и R41/R744 в состоянии насыщения и оценена эффективность указанных смесей как рабочих тел холодильных машин.

2. СВОЙСТВА СМЕСЕЙ ПРИ ФАЗОВОМ РАВНОВЕСИИ

В качестве хладагентов желательнее использовать

наряду с чистыми веществами азеотропные смеси. Это позволяет поддерживать оптимальные значения разности температур между водой либо воздухом и хладагентом при его конденсации и между охлаждаемым объектом и испаряющимся хладагентом, что способствует уменьшению потерь от внешней необратимости процессов теплообмена при конечных разностях температур.

Для анализа термодинамического поведения смесей R23/R744 и R41/R744 в состоянии фазового равновесия построены p, T, x -диаграммы зависимости давления этих смесей от температуры и состава. Они построены для четырёх значений составов (0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 мольные доли первого компонента) и для чистых компонентов. На диаграммах значения давлений лежат в интервале от 0,1 МПа до критического давления. При этом изобара 0,1 МПа изображена штриховой линией, а критические точки чистых компонентов и первые критические точки смесей разного состава, в которых состав и значения плотности обеих фаз совпадают, связаны критической кривой [4].

Как видно из p, T, x -диаграммы для смеси R23/R744 (рис. 1), она не является азеотропной, но кривые кипения и конденсации для всех составов

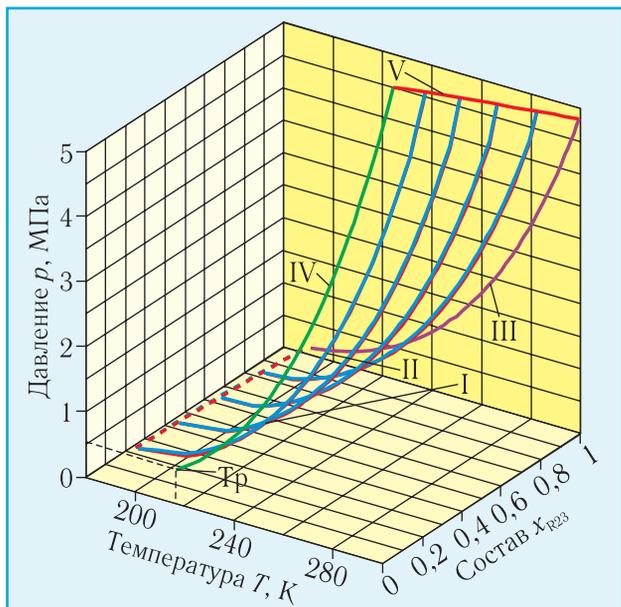


Рис. 1. Зависимость давления насыщенного пара и жидкости от температуры и состава для смесей R23/R744: I и II — кривые кипения и конденсации смесей, III и IV — кривые парообразования компонентов R23 и R744; V — критическая кривая; Tr — тройная точка диоксида углерода

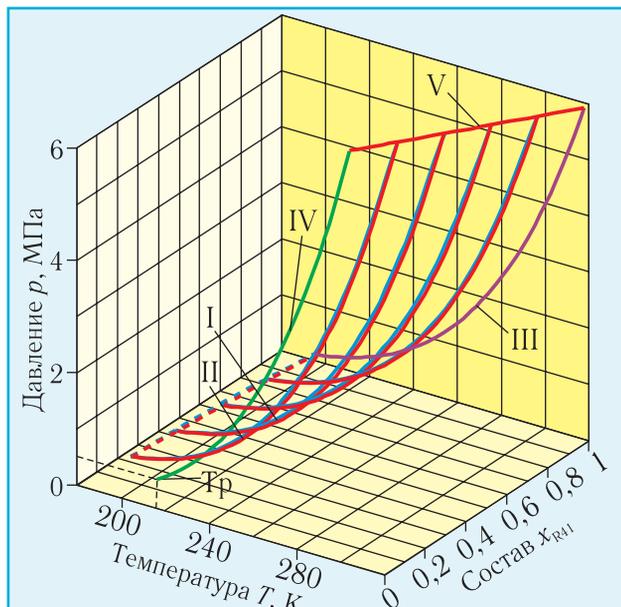


Рис. 3. Зависимость давления насыщенного пара и жидкости от температуры и состава для смесей R41/R744: I и II — кривые кипения и конденсации смесей; III и IV — кривые парообразования компонентов R41 и R744; V — критическая кривая; Tr — тройная точка диоксида углерода

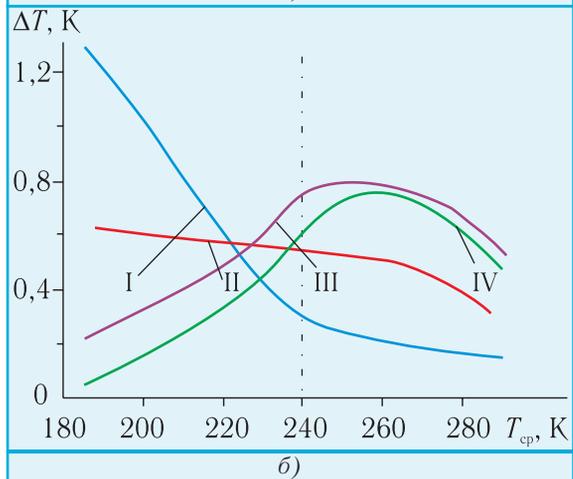
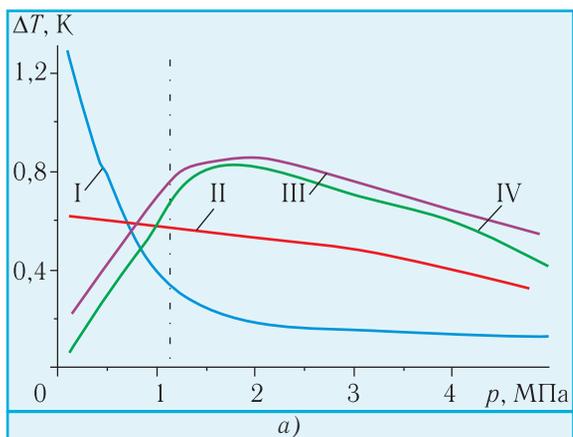


Рис. 2. Зависимость разности температур насыщенного пара и жидкости ΔT на изобарах от давления (а) и температуры T_{cp} (б) для смесей R23/R744: I, II, III, IV — для составов, соответственно, 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 мольной доли R23

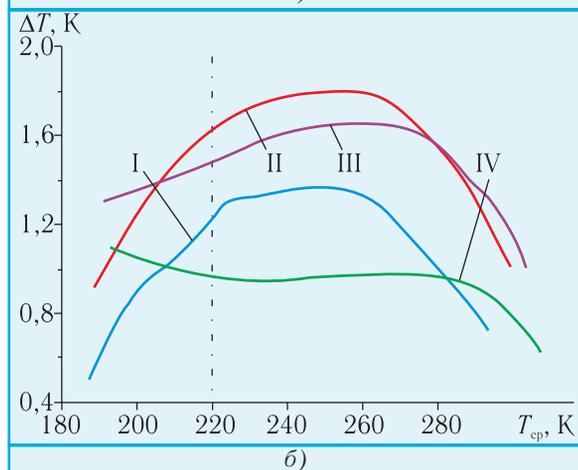
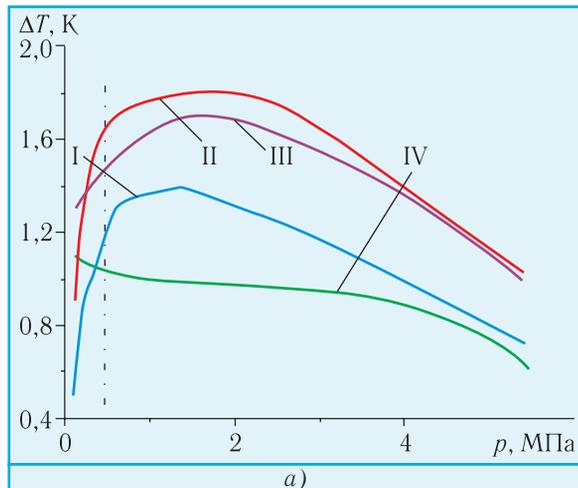


Рис. 4. Зависимость разности температур насыщенного пара и жидкости ΔT на изобарах от давления (а) и температуры T_{cp} (б) для смесей R41/R744: I, II, III, IV — для составов, соответственно, 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 мольной доли R41

Таблица 1. Значения холодильного коэффициента цикла одноступенчатой холодильной машины при работе на различных хладагентах

$t_k, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$					$t_n, ^\circ\text{C}$				
	-40	-35	-30	-25	-20	-40	-35	-30	-25	-20
	Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,2$					Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,4$				
5	3,39	4,02	4,83	5,92	7,43	3,32	3,95	4,75	5,81	7,28
10	2,88	3,38	3,99	4,79	5,84	2,82	3,31	3,92	4,69	5,72
15	2,45	2,84	3,32	3,91	4,68	2,39	2,77	3,24	3,82	4,57
20	2,06	2,37	2,75	3,20	3,76	2,00	2,31	2,67	3,11	3,66
25	1,72	1,95	2,24	2,58	2,99	1,62	1,83	2,09	2,39	2,77
	Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,6$					Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,8$				
5	3,32	3,94	4,72	5,76	7,19	3,39	4,00	4,78	5,81	7,25
10	2,81	3,29	3,89	4,65	5,66	2,86	3,34	3,93	4,69	5,70
15	2,38	2,75	3,21	3,78	4,51	2,41	2,79	3,24	3,81	4,54
20	1,98	2,28	2,63	3,06	3,60	2,01	2,30	2,65	3,08	3,61
25	1,54	1,75	1,99	2,28	2,63	1,55	1,76	2,00	2,29	2,65
	Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,2$					Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,4$				
5	3,53	4,14	4,92	5,96	7,40	3,58	4,19	4,96	5,99	7,41
10	3,02	3,51	4,11	4,88	5,91	3,08	3,57	4,17	4,94	5,96
15	2,60	2,98	3,46	4,05	4,81	2,66	3,05	3,53	4,12	4,88
20	2,23	2,54	2,91	3,37	3,95	2,30	2,62	3,00	3,46	4,04
25	1,89	2,14	2,44	2,80	3,24	1,97	2,23	2,54	2,90	3,35
	Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,6$					Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,8$				
5	3,66	4,28	5,07	6,12	7,57	3,76	4,40	5,22	6,32	7,84
10	3,07	3,55	4,16	4,91	5,95	3,25	3,76	4,30	5,22	6,31
15	2,74	3,14	3,63	4,24	5,02	2,82	3,24	3,75	4,38	5,20
20	2,38	2,71	3,10	3,58	4,17	2,41	2,75	3,15	3,64	4,33
25	2,06	2,33	2,64	3,02	3,49	2,10	2,42	2,75	3,15	3,64
	Для R22					Для R23				
5	4,28	5,02	5,97	7,24	9,03	3,54	4,17	4,98	6,07	7,59
10	3,76	4,36	5,11	6,08	7,37	2,99	3,48	4,09	4,88	5,94
15	3,34	3,83	4,44	5,20	6,17	2,51	2,89	3,36	3,95	4,71
20	2,98	3,39	3,90	4,51	5,27	2,08	2,38	2,74	3,18	3,73
25	2,68	3,03	3,45	3,95	4,57	1,64	1,86	2,13	2,44	2,83
	Для R41					Для R744				
5	3,85	4,52	5,40	6,57	8,21	3,53	4,16	4,97	6,06	7,60
10	3,33	3,87	4,54	5,42	6,59	3,00	3,50	4,12	4,92	5,99
15	2,90	3,33	3,87	4,54	5,41	2,56	2,95	3,43	4,04	4,82
20	2,53	2,89	3,32	3,85	4,51	2,18	2,49	2,86	3,32	3,90
25	2,22	2,51	2,86	3,28	3,80	1,82	2,07	2,35	2,71	3,14

весьма близки. Более точно определить разность температур насыщенных пара и жидкости на изобарах для четырёх составов смеси R23/R744 в интервалах давлений от 0,1 до 5 МПа и средних значений температуры насыщенных пара и жидкости на изобарах от 185 до 290 К можно с помощью графиков, представленных на рис. 2. На графиках вертикальная штрихпунктирная линия отделяет область низких температур и давлений, где расчётные данные получены экстраполяцией за пределы действия уравнения состояния. Разность температур насыщенных пара и жидкости для данной смеси не превышает 1,3 К, что позволяет использовать её в качестве хладагента в широком интервале значений состава.

На рис. 3 представлена p, T, x -диаграмма смеси R41/R744 в состоянии равновесия фаз. Диаграмма показывает, что эта смесь аналогично предыдущей не

является азеотропной, но имеет близкие кривые кипения и конденсации. Для количественной оценки поведения смеси R41/R744 различных составов в состоянии насыщения построены графики зависимости разности температур насыщенных пара и жидкости на изобарах от давления и средних значений температуры насыщения на изобарах (рис. 4). Из рисунка видно, что разность температур насыщенных пара и жидкости для смеси R41/R744 не превышает 1,8 К. Таким образом, эта смесь в широком интервале значений состава пригодна в качестве хладагента.

3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦИКЛА ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ ПРИ РАБОТЕ НА СМЕСЯХ

Для оценки эффективности смесей R23/R744 и

Таблица 2. Значения удельной объёмной холодопроизводительности (кДж/м³) цикла одноступенчатой холодильной машины при работе на различных хладагентах

$t_k, ^\circ\text{C}$	$t_n, ^\circ\text{C}$					$t_n, ^\circ\text{C}$				
	-40	-35	-30	-25	-20	-40	-35	-30	-25	-20
	Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,2$					Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,4$				
5	5165	6293	7579	9041	10702	4759	5828	7049	8439	10020
10	4844	5903	7110	8482	10039	4445	5445	6586	7885	9361
15	4500	5484	6607	7881	9326	4107	5032	6087	7287	8650
20	4119	5022	6050	7217	8538	3732	4573	5533	6624	7860
25	3737	4490	5399	6439	7614	3289	3957	4723	5599	6592
	Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,6$					Для смеси R23/R744 при $x_{R23}=0,8$				
5	4416	5401	6529	7820	9294	4115	5007	6034	7215	8569
10	4112	5031	6083	7286	8658	3826	4657	5613	6713	7972
15	3784	4631	5601	6709	7970	3513	4278	5159	6169	7326
20	3420	4187	5064	6065	7204	3164	3855	4649	5560	6601
25	2886	3480	4163	4942	5828	2637	3186	3820	4546	5373
	Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,2$					Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,4$				
5	5084	6109	7293	8653	10211	4628	5562	6642	7885	9311
10	4813	5785	6907	8197	9672	4398	5287	6315	7497	8854
15	4525	5441	6497	7710	9098	4155	4996	5968	7087	8369
20	4213	5067	6052	7183	8475	3893	4683	5595	6645	7847
25	3862	4647	5552	6590	7775	3605	4338	5184	6158	7272
	Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,6$					Для смеси R41/R744 при $x_{R41}=0,8$				
5	4250	5106	6096	7235	8542	3917	4705	5615	6661	7859
10	4088	4912	5862	6944	8193	3745	4500	5382	6372	7519
15	3844	4620	5518	6551	7735	3565	4284	5115	6069	7161
20	3621	4354	5201	6176	7292	3378	4062	4850	5752	6782
25	3379	4065	4857	5768	6811	3172	3815	4551	5402	6374
	Для R22					Для R23				
5	875,6	1097	1360	1671	2037	3848	4649	5578	6653	7890
10	847,7	1062	1318	1620	1975	3577	4324	5190	6190	7342
15	819,4	1027	1275	1568	1912	3284	3971	4768	5688	6746
20	790,8	991,8	1232	1515	1848	2952	3572	4291	5120	6071
25	761,7	955,9	1187	1462	1784	2509	3038	3650	4354	5158
	Для R41					Для R744				
5	3611	4338	5176	6137	7236	5680	6815	8119	9609	11306
10	3461	4158	4962	5884	6937	5355	6426	7656	9062	10661
15	3304	3971	4739	5620	6626	5007	6010	7162	8476	9972
20	3139	3774	4505	5342	6299	4625	5553	6618	7833	9213
25	2964	3564	4255	5048	5952	4180	5021	5984	7083	8329

R41/R744 как хладагентов нами рассчитаны основные характеристики цикла одноступенчатой холодильной машины при использовании этих смесей в качестве рабочих тел. Были определены массовая и объёмная холодопроизводительности, работа адиабатного сжатия и холодильный коэффициент. Расчёты проводились с помощью разработанной нами программы для расчёта циклов одноступенчатых пароконпрессорных холодильных машин, описанной в работе [5]. Свойства хладагентов рассчитывались по уравнениям состояния с помощью автоматизированной информационной системы [3], которая позволяет определять свойства ряда чистых хладагентов и их смесей при 12 комбинациях независимых переменных.

В табл. 1 приведены значения холодильного коэффициента ϵ цикла одноступенчатой холодильной машины с регенеративным теплообменом при

$t_n = -40 \dots -20$ °C, $t_k = 5 \dots 25$ °C и $\Delta t_{ж} = 5$ °C при работе на смесях R23/R744 и R41/R744 четырёх составов, а также на компонентах этих смесей и на R22. В качестве значений температур испарения t_n и конденсации t_k принимались температуры конца этих процессов. Из таблицы видно, что значения ϵ для первой смеси на 18...42 %, а для второй — на 12...29 % меньше, чем при работе на R22. Вторая смесь на 2...38 % превосходит первую по энергетической эффективности (при сравнении смесей с одинаковой мольной долей диоксида углерода). Различия между значениями холодильного коэффициента сравниваемых смесей возрастают по мере уменьшения содержания CO₂. Значения этого коэффициента для смеси R23/R744 меньше соответствующих значений для компонентов на 2...15 %. Для смеси R41/R744 значения ϵ в большинстве случаев являются промежуточными по сравне-

нию с аналогичными величинами для компонентов.

В табл. 2 представлены значения удельной объемной холодопроизводительности q_{0v} смесей R23/R744 и R41/R744 четырех составов, их компонентов и R22 в цикле одноступенчатой холодильной машины с регенеративным теплообменом при условиях, указанных выше. Из таблицы видно, что значения q_{0v} для обеих смесей в несколько раз выше, чем для R22 (несмотря на меньшие по сравнению с R22 значения ϵ). Объемная холодопроизводительность первой смеси при температурах конденсации 5...15 °С больше, чем второй, а при более высоких температурах меньше (при одинаковом содержании диоксида углерода). Значения q_{0v} смесей являются промежуточными по сравнению с соответствующими значениями для компонентов.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании данных о свойствах смесей R23/R744 и R41/R744 в состоянии насыщения установлено, что значения температур жидкой и паровой фаз на изобарах отличаются не более, чем на 2 °С. Это свидетельствует о возможности использования указанных смесей в качестве хладагентов.

Значения холодильного коэффициента смесей на 12...42 % ниже, а их объемная холодопроизводительность в несколько раз выше, чем у R22. Для смеси R41/R744 холодильный коэффициент при температу-

рах испарения от -40 до -20 °С и конденсации 5...25 °С на 2...38 % выше, чем для смеси R23/R744. Следовательно, с энергетической точки зрения смесь R41/R744 имеет преимущество перед смесью R23/R744. В то же время необходимый рабочий объем компрессора при работе на смеси R23/R744 и температурах конденсации 5...15 °С будет меньше на 1...9 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мальчевский В.П. Уравнение состояния смеси хладагентов R23/R744// Холодильная техника и технология. — 2006. — № 6. — С. 66-69.
2. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Термодинамические свойства смеси хладагентов R41/R744// Вестник Одесского национального морского университета. — 2007. — № 21. — С. 97-108.
3. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Система для расчёта теплофизических свойств криогенных веществ и альтернативных хладагентов// Технические газы. — 2007. — № 5. — С. 57-63.
4. Кириллин В.А., Шейндлин А.Е., Шпильрайн Э.Э. Термодинамика растворов. — М.: Энергия, 1980. — 287 с.
5. Вассерман А.А., Мальчевский В.П. Об эффективности смесей R125/R290 и R134a/R290 как рабочих тел холодильных машин// Технические газы. — 2008. — № 3. — С. 55-59.

ДЕВЯТЫЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ БИЗНЕС-ФОРУМ И ВЫСТАВКА
THE 9th INTERNATIONAL BUSINESS-FORUM AND EXHIBITION



МЭДВИН: МИР СЖИЖЕННЫХ И СЖАТЫХ ГАЗОВ '2009

WORLD of LIQUIFIED and COMPRESSED GASES '2009

LPG, CNG, LNG, technical gases

- ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПГ, СУГ, СПГ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ: газобаллонное и газозаправочное оборудование, переоборудование автомобилей на газ;
- СИСТЕМЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ХРАНЕНИЯ СЖИЖЕННЫХ И СЖАТЫХ ГАЗОВ;
 - СИСТЕМЫ ГАЗИФИКАЦИИ;
- КОМПРЕССОРНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ;
- ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОСУШКИ И ОЧИСТКИ ГАЗОВ;
- КРИОГЕННЫЕ И ХОЛОДИЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ;
- ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА;
- КОГЕНЕРАЦИОННЫЕ И МНОГОЦЕЛЕВЫЕ УСТАНОВКИ, РАБОТАЮЩИЕ НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ.

КИЕВ

10-12

ИЮНЯ

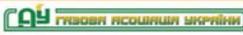

КИЕВ ЭКСПО ПЛАЗА

ул. САЛЮТНАЯ, 2Б

СТ. М. "НИВКИ"

Организаторы:
 Газовая Ассоциация Украины;
 Киевская городская госадминистрация;
 Министерство топлива и энергетики Украины;
 Министерство транспорта Украины;
 Украинская ассоциация производителей технических газов "УА-СИГМА";
 Предприятие "МЭДВИН".

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ПАРТНЕРЫ:



Современная АЗС

OilMARKET



Газ & Нафта

Єнергетичний бізнес



НЕОТЕРЬНОК



CZAS NA GAZ!



ТРАНСПОРТ



WORLD OF GAS

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ СПОНСОР:



Героев Сталинграда пр-т, 12-Е, оф. "МЭДВИН", Киев, 04210

Тел./факс: (044) 501-03-42, 501-03-44, 501-03-66

E-mail: mail@medvin.kiev.ua; www.medvin.kiev.ua

