

**И.Ф. Кузьменко, Ю.Н. Румянцев, Г.И. Сайдаль\***

ОАО «Криогенмаш», пр. Ленина, 67, г. Балашиха Московской области, РФ, 143907

\*e-mail: saydal@cryogenmash.ru

## СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОНСТРУИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ ЖИДКОГО ВОДОРОДА

*Наблюдаемый рост производства оборудования для хранения и транспортирования жидкого водорода сопровождается одновременно с этим повышением технических требований к нему. Современное производство жидководородных резервуаров - это область со своими правилами, солидной базой научной, технической и нормативной информации. Бизнес-проекты инфраструктур применения водорода все чаще показывают, что наиболее дешевый способ хранения больших количеств водорода и его транспортирования на средние и большие расстояния обеспечивается с помощью криогенной технологии. Основное внимание при изготовлении резервуаров для жидкого водорода в ОАО «Криогенмаш» в настоящее время уделяется достижению высоких технических характеристик: предельно низких потерь от испарения, высокой скорости выдачи продукта при сохранении низкой стоимости изделий. Проектирование осуществляется в соответствии с отечественными и зарубежными нормами безопасности применения водорода. Рассматриваются особенности конструкций и технологий изготовления криогенных резервуаров для жидкого водорода, сообщаются их основные технические показатели.*

**Ключевые слова:** Криогенный резервуар. Водород. Вакуум. Криогенная теплоизоляция. Потери от испарения. Безопасность. Технология изготовления.

**I.F. Kuzmenko, Yu.N. Rumyantsev, G.I. Sajdal**

## MODERN TENDENCIES IN DESIGNING AND MANUFACTURING OF TANKS FOR STORAGE AND TRANSPORTATION OF LIQUID HYDROGEN

*Observable growth of manufacture of the equipment for storage and transportations of liquid hydrogen is accompanied simultaneously with increase of technical requirements to it. Modern manufacture of liquid hydrogen tanks is an area with the rules, considerable base of the scientific, technical and normative information. Business-projects in infrastructures on application of hydrogen more often show that the cheapest way of storage of hydrogen and its transportation on average and big distances is provided with the help of cryogenic technology. The basic attention at manufacturing tanks for liquid hydrogen in JSC «Cryogenmash» now is given to achievement of high characteristics: extremely low vapor losses, high speed of delivery of product at preservation of low cost of products. Designing is carried out according to domestic and foreign norms of safety of using of hydrogen. Features of designs and manufacturing techniques of cryogenic tanks for liquid hydrogen are considered, their basic technical parameters are informed in article.*

**Keywords:** Cryogenic tank. Hydrogen. Vacuum. Cryogenic heat-insulation. Vapor loss. Sa-fety. Manufacturing methods.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Создание ёмкостного оборудования для хранения и транспортирования жидкого водорода является сложной технической задачей. Наше предприятие имеет значительный опыт разработки, конструирования и изготовления крупногабаритных криогенных резервуаров для жидкого водорода. В настоящее время эти работы получают новый импульс в связи с широкими

перспективами развития водородной энергетики.

Анализ стоимостных показателей, например, в [1], показывает, что наиболее дешевыми являются способы хранения водорода в подземных выработках и в криогенных ёмкостях. Этот вывод можно распространить и на транспортирование водорода, когда его промышленные объёмы дешевле всего перемещать на небольшие расстояния, используя перекачку по трубопроводам. На большие расстояния экономически

**Таблица 1.** Технические характеристики жидководородных криогенных резервуаров

| Основные характеристики                        | Типы резервуаров |             |               |
|--|------------------|-------------|---------------|
|  | ЦТВ-45/1,0       | РЦГВ-60/1,1 | РЦГВ-250/0,25 |
| Вместимость, м <sup>3</sup>                    | 45               | 60          | 248           |
| Рабочее давление, МПа                          | 1,0              | 1,1         | 0,25          |
| Масса хранимого водорода, кг                   | 2740             | 3850        | 16680         |
| Потери водорода от испарения, кг/ч (% в сутки) | 1,375 (1,0)      | 0,95 (0,6)  | 1,39 (0,2)    |
| Масса изделия, кг                              | 21760            | 35000       | 86300         |
| Габаритные размеры, мм                         |                  |             |               |
| – длина  | 15700            | 14600       | 36642         |
| – ширина                                       | 2500             | 3900        | 3806          |
| – высота                                       | 3700             | 3610        | 3971          |

оправдана перевозка водорода в сжиженном состоянии автомобильным или железнодорожным транспортом. В связи с этим многочисленные усилия направлены как на развитие производства жидкого водорода, так и на обеспечение инфраструктуры потребления, в состав которой входят средства его хранения и транспортирования.

## 2. ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СОВРЕМЕННЫХ ЖИДКОВОДОРОДНЫХ КРИОГЕННЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Последними нашими современными разработками оборудования для жидкого водорода являются резервуар РЦГВ-60/1,1, стационарные резервуары РЦГВ-250/0,25 и транспортная цистерна ЦТВ-45/1,0. Технические характеристики этих резервуаров представлены в табл. 1.



**Фото 1.** Резервуар РЦГВ-250/0,25 транспортируется к месту его установки у заказчика

На фото 1 — наиболее крупный изготовленный предприятием стационарный резервуар РЦГВ-250/0,25 в процессе его доставки наземным транспортом к месту установки. Резервуар предназначен для сбора жидкого водорода после его ожижения, постоянного хранения и периодической выдачи. Испаряющийся в резервуаре за счёт теплопритоков из окружающей среды водород направляется на повторное ожижение. Фото 2 позволяет представить массогабаритные характеристики наиболее крупного резервуара из производимых нами (см. табл. 1) и технологию его

перемещения, транспортирования и установки.

Рассмотрим конструкционные особенности резервуаров.

Для этого в качестве примера проанализируем технологическую схему резервуара ЦТВ-45/1,0.

На фото 3 и 4 показаны сосуд цистерны и арматурный шкаф ЦТВ-45/1,0

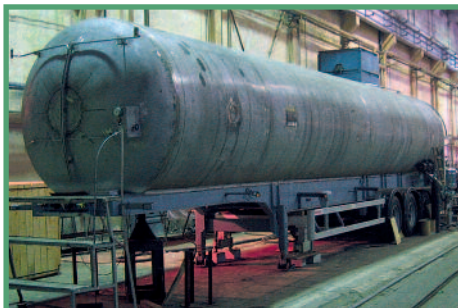
на последних стадиях изготовления, а именно, в процессе проверочных замеров глубины вакуума в теплоизоляционном пространстве, величин остаточного газовыделения и натекания, а также потерь от испарения при заправке цистерны жидким азотом.

Конструкции резервуаров достаточно сложны. Для иллюстрации приведём технологическую схему цистерны ЦТВ-45/1,0 (рис. 5). Это обусловлено как наличием сложных систем заправки и выдачи жидкого водорода, удовлетворяющих всем имеющимся требованиям по технике безопасности при работе с ним, комплексом предохранительных клапанов и мембран, так и наличием системы предварительной подготовки резервуаров продувкой газообразным чистым азотом

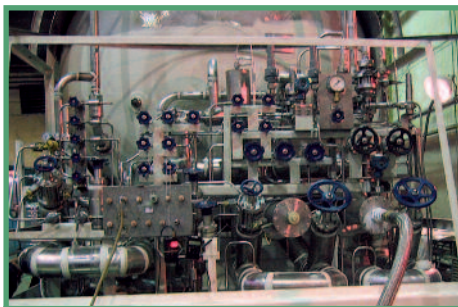


**Фото 2.** Этапы доставки резервуара РЦГВ-250/0,25: а — установка резервуара на автомобильную платформу; б, в — погрузка его на судно и размещение на палубе для морской доставки; г — вид резервуара после выгрузки в порту

или вакуумированием перед заправкой водородом.



**Фото 3.** Сосуд цистерны ЦТВ-45/1,0 на этапе вакуумных его испытаний



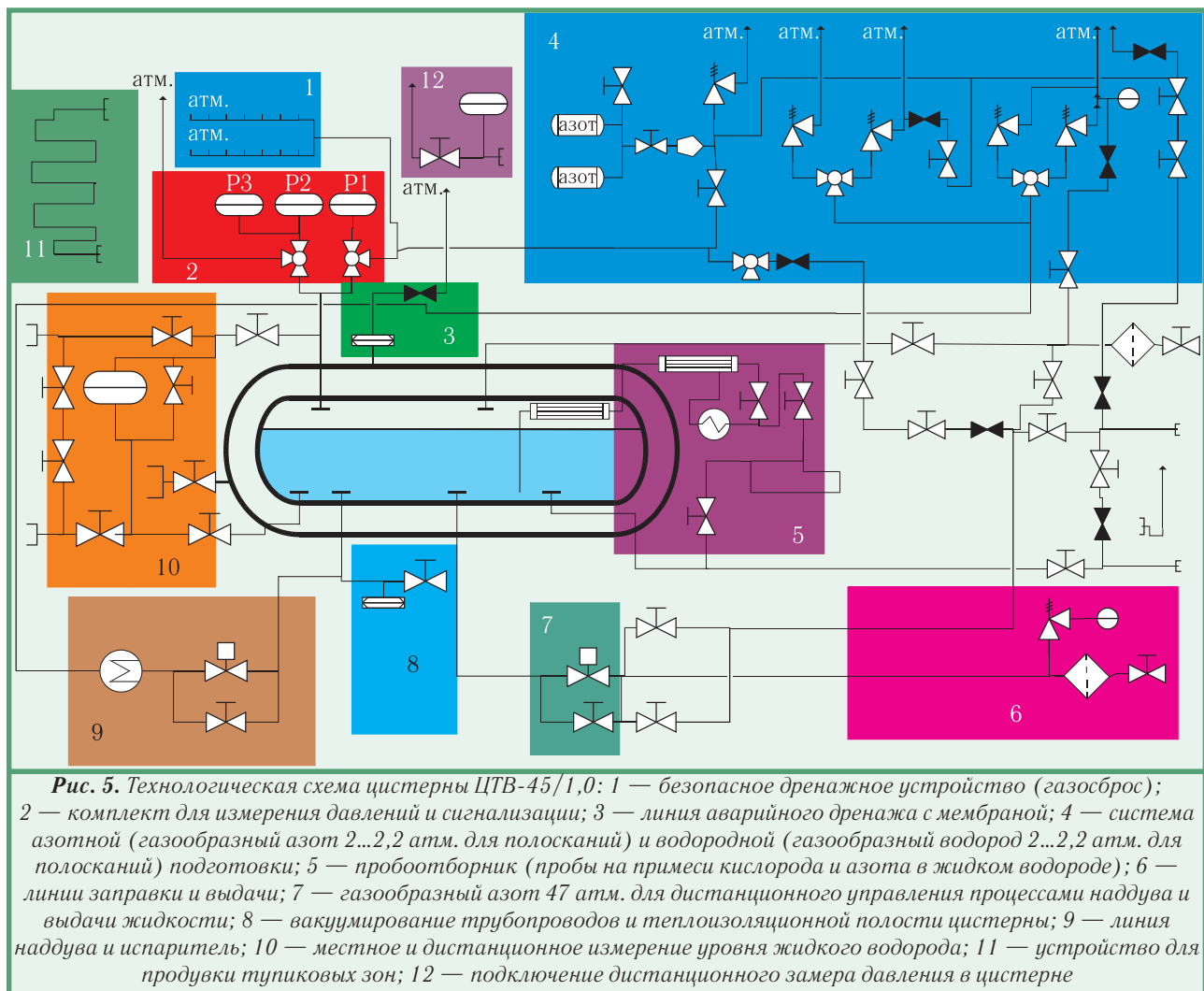
**Фото 4.** Арматурный шкаф цистерны ЦТВ-45/1,0 в процессе сборки

Замена газовой среды в резервуарах осуществляется в два этапа. На рис. 5 выделены системы, объединённые каким-либо одним функциональным назначением. Но некоторые элементы технологической схемы, такие как устройство для сохранения кондиции жидкого водорода, теплообменники для подогрева сбросного водорода выше 100 К и некоторые другие, не отмечены.

Технологические схемы жидководородных резервуаров являются более многоэлементными по сравнению со схемами других типов криогенных резервуаров. Они обеспечивают заправку жидким водородом и выдачу его, безопасную эксплуатацию резервуара, замещение в нём газовой среды и др. функции. Система предохранительных клапанов и разрывных мембран позволяет безопасно эксплуатировать резервуар в соответствии с требованиями отечественных и европейских норм.

Кожух, внутренний сосуд и трубопроводные коммуникации изготавливаются из высококачественных сталей, предназначенных для соответствующих температурных диапазонов. Их поэлементный расчёт выполнен с помощью современных компьютерных программ MSC.Software.

Резервуары оснащены фильтрами тонкой очистки жидкого водорода и пробоотборником специальной



**Рис. 5.** Технологическая схема цистерны ЦТВ-45/1,0: 1 — безопасное дренажное устройство (газосброс); 2 — комплект для измерения давлений и сигнализации; 3 — линия аварийного дренажа с мембраной; 4 — система азотной (газообразный азот 2...2,2 атм. для полосканий) и водородной (газообразный водород 2...2,2 атм. для полосканий) подготовки; 5 — пробоотборник (пробы на примеси кислорода и азота в жидком водороде); 6 — линии заправки и выдачи; 7 — газообразный азот 47 атм. для дистанционного управления процессами наддува и выдачи жидкости; 8 — вакуумирование трубопроводов и теплоизоляционной полости цистерны; 9 — линия наддува и испаритель; 10 — местное и дистанционное измерение уровня жидкого водорода; 11 — устройство для продувки тупиковых зон; 12 — подключение дистанционного замера давления в цистерне

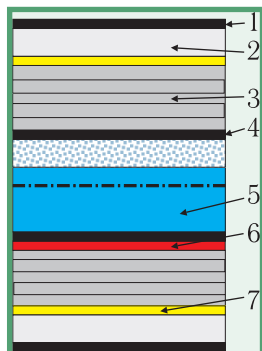
конструкции, позволяющим производить отбор водорода для анализов на содержание примесей без влияния на их результаты процесса сепарации при фазовом переходе. В конструкциях резервуаров предусмотрены специальные устройства, предотвращающие образование воронок при подаче жидкости через нижний слив. В цистерне ЦТВ-45/1,0 используются эффективные волногасители.

### 3. СОЗДАНИЕ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИИ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

Все резервуары имеют высокоэффективную теплоизоляционную систему, существенно улучшенную по сравнению с водородными резервуарами 80-х и 90-х гг. прошлого века. Для подтверждения сошлёмся на величины потерь жидкого водорода от испарения за счёт теплопритоков из окружающей среды, указанные в табл. 1. Для достижения таких показателей модернизации были подвергнуты вакуумная изоляция, крепёжные элементы внутреннего сосуда (опоры и стойки), криоадсорбционные насосы для поддержания высокого вакуума в изоляционной полости.

Оценим потери водорода от испарения в стоимостном выражении на примере резервуара РЦГВ-250/0,25. При испарении водорода на уровне 0,2 % в сутки и максимальном коэффициенте заполнения резервуара 0,95 потери составят 1,39 кг/ч водорода. Согласно [2,3] средняя стоимость 1 кг газообразного водорода составляет 1 еуро, а 1 кг жидкого водорода — 4 еуро. В этом случае годовые потери при сбросе испарившегося водорода в атмосферу для резервуара РЦГВ-250/0,25 достигнут 35 тыс. Еуро для одного резервуара. При повторном ожижении испарившегося водорода годовые потери можно снизить до 23 тыс. Еуро. Эти стоимостные оценки объясняют, почему такое большое внимание покупатели резервуаров уделяют потерям водорода от испарения.

Изоляционная система криогенных резервуаров выполнена по традиционной схеме с использованием слоисто-вакуумной изоляции без охлаждаемых азотных экранов. Повышение эффективности изоляционной системы было достигнуто нами за счёт увеличения толщины изоляционного слоя, более тщательного изолирования сопрягаемых элементов (выводов труб, опор, стоек), достижения более высокого вакуума в слоях изоляции. Принципиальная схема теплоизоляционной системы



**Рис. 6.** Схема теплоизоляционной системы криогенных жидководородных резервуаров: 1 — кожух резервуара; 2 — пространство с высоким вакуумом; 3 — слой слоисто-вакуумной изоляции; 4 — внутренний сосуд; 5 — жидкий водород; 6 — криоадсорбционный вакуумный насос; 7 — чехол из стеклоткани

показана на рис. 6. Криоадсорбционный вакуумный насос 6, расположенный для обеспечения его захлаживания вне зависимости от уровня жидкого водорода в резервуаре в нижней части внутреннего сосуда, содержит такое количество адсорбента, которое достаточно для поддержания высокого вакуума в теплоизоляционной полости в течение всего срока службы резервуара.

При изготовлении криогенных резервуаров используется панельный метод нанесения слоисто-вакуумной изоляции. При его реализации предварительно изготавливаются элементы изоляции в виде плоских панелей различного вида, размеров, толщины, конфигурации и обшивки. На каждую панель предварительно разрабатываются чертежи. На фото 7,а — круглая панель (мат), обшитая стеклотканью. Маты данного типа представляют собой элементы изоляции опор, стоек и крепёжных поясов. На фото 7,б — плоский мат. Данный вид матов идёт на изоляцию доннышек внутренних сосудов криогенных резервуаров. Такие же, но прямоугольные маты, используются для изоляции цилиндрической части внутреннего сосуда. Маты изготавливаются ручным способом на столах с помощью размоточных станков, один из которых показан на фото 8,а. Изготовление ведётся на отдельном оборудованном участке изоляции, вид которого приведён на фото 8,б.



**Фото 7.** Некоторые элементы теплоизоляционных систем криогенных резервуаров: а — круглый обшитый стеклотканью мат; б — плоский профилированный мат

В используемой нами технологии значительной оказывается доля ручного труда. Причем изготовление и нанесение изоляции осуществляют рабочие, прошедшие специальное обучение и получившие практический опыт работ под контролем. Это приводит к высокой стоимости создаваемой изоляции. К недостатку относится также необходимость иметь на каждый мат и пакет отдельный чертеж, что увеличивает

ет время разработки конструкторской документации. Вместе с тем, указанной технологии изготовления присущи и существенные достоинства:

1. При ручном изолировании в отличие от механизированного способа нанесения можно обеспечивать оптимальную монтажную плотность, т.е. число слоёв изоляции на 1 см её толщины. Отклонения от средней монтажной плотности оказываются незначительными. Это приводит к изотермичности слоёв и, как результат, к высоким теплоизоляционным показателям.

2. Структура изоляционного слоя характеризуется высокой вакуумируемостью. Это ускоряет выход изделий на проектные показатели и существенно увеличивает срок службы криогенного оборудования в связи с высокой дегазацией изделий при вакуумной подготовке их в процессе изготовления.

3. Пакетная технология нанесения изоляции обуславливает низкие значения потерь теплоизоляционной эффективности теплоизоляционной системы ввиду низкой продольной теплопроводности.



**Фото 8.** Технологическое оборудование для изготовления теплоизоляционных систем: а — размоточный станок; б — участок для изготовления слоисто-вакуумной теплоизоляции

Все это позволяет получать при пакетном нанесении наивысшие значения теплоизоляционной эффективности слоисто-вакуумной изоляции, которые сравнимы с максимально достижимыми в настоящее время в мировой практике.

Завершающим этапом в технологии пакетного изолирования является монтаж пакетов на внутренних сосудах резервуаров. Он осуществляется после размещения внутреннего сосуда на специальном столе для нанесения изоляции.

В табл. 2 указан состав слоисто-вакуумной изоля-

ции, изготавливаемой на предприятии. Состав приведён для случая, когда используются 5 панелей, содержащих по 9 слоёв металлизированной пленки и стеклотумаги-разделителя. Весовой состав требуется тогда, когда необходимо определять темп захлаживания изоляции при заполнении резервуаров и в редких случаях, когда изоляция используется в резервуарах для научных исследований, где важно определение естественной радиоактивности составляющих изоляционных материалов.

**Таблица 2.** Показатели слоисто-вакуумной изоляции

| Материал  | Удельная масса, г/м <sup>2</sup> | Относительная доля, % |
|---|----------------------------------|-----------------------|
| Металлизированная полиэтилен-терефталатная пленка ПЭТФ-ДА, 12 мкм | 855                              | 54,9                  |
| Штапельная стеклотумага БмД-К                                     | 540                              | 34,67                 |
| Стеклолента ЛЭС-0,2 20  | 91                               | 5,84                  |
| Стеклоткань Э4-62п  | 69                               | 4,43                  |
| Нитки полиамидные ЗК  | 2,5                              | 0,16                  |
| Всего   | 1557,5                           | 100                   |

Последним этапом изготовления являются испытания на соответствие контрактным характеристикам. Испытания проходят в два этапа. На предприятии проводится проверка всех технических характеристик с использованием в качестве криоагента жидкого азота. У заказчиков осуществляется последний этап испытаний, в ходе которых определяют потери от испарения при заливке резервуара жидким водородом.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2006-2007 гг. был изготовлен ряд крупнообъемных стационарных и транспортных резервуаров для жидкого водорода ЦТВ-45/1,0, РЦГВ-250/0,25 и РЦГВ-60/1,1. Основные технические параметры этих резервуаров соответствуют высоким требованиям, предъявляемым к таким изделиям.

Испытания, выполненные с использованием жидкого азота на нашей производственной площадке, показали, что потери от испарения при заполнении резервуаров жидким азотом и их вакуумные характеристики отвечают значениям, указываемым в технической документации. Это даёт основания считать, что и в ходе испытаний с жидким водородом также будут получены ожидаемые положительные результаты.

Опыт изготовления криогенных водородных резервуаров в течение последних 5-7 лет позволяет нам сформулировать следующие основные тенденции в производстве резервуаров для жидкого водорода:

1. Существенное повышение эффективности теплоизоляционной системы резервуаров вплоть до предельно достижимых значений, которые характерны для используемого типа изоляции.

2. Постоянное усложнение технологической схемы резервуаров, позволяющее расширять функциональность оборудования и удовлетворять возрастающим техническим требованиям.

3. Ужесточение норм безопасности и расширение механизмов и способов их контроля.

4. Переход на цифровые методы проектирования изделий и хранения конструкторской и сопутствующей документации.

1. **Wade A. Amos.** Costs of storing and transporting hydrogen. — National Renewable Energy Laboratory, USA. — 216 p. (<http://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25106.pdf>)

2. **Кузык Б.Н., Яковец Ю.В.** Россия: стратегия перехода к водородной энергетике. — М.: Институт экономических стратегий, 2007. — 400 с.

3. **Дмитриев А.Л.** Экономические и технические проблемы развития водородного транспорта с целью улучшения экологического состояния окружающей среды// Альтернативная энергетика и экология. — 2004. — № 1 (<http://isjaee.hydrogen.ru/?pid=483>)

**ЛИТЕРАТУРА**

ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# “ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ”

ВСЕ О НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗАХ  
И ПРОДУКТАХ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА —  
В ОДНОМ ЖУРНАЛЕ!

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ**  
Журнал №1 2008

**ИЗДАТЕЛЬ — УКРАИНСКАЯ АССОЦИАЦИЯ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ “УА-СИГМА”**

ЖУРНАЛ ЗАРЕГИСТРИРОВАН В ГОСКОМИТЕТЕ ИНФОРМАЦИОННОЙ ПОЛИТИКИ, ТЕЛЕ- И РАДИОВЕЩАНИЯ УКРАИНЫ — СВИДЕТЕЛЬСТВО КВ № 4943 ОТ 15.03.2001 Г. С 2005 Г. — ОФИЦИАЛЬНОЕ ИЗДАНИЕ ВАК УКРАИНЫ. ПЕРИОДИЧНОСТЬ ИЗДАНИЯ — 6 ВЫПУСКОВ В ГОД. ОБЪЕМ КАЖДОГО ВЫПУСКА — 72 СТР. ПУБЛИКУЕМЫЕ СТАТЬИ РЕФЕРИРУЮТСЯ В РАЗЛИЧНЫХ ЖУРНАЛАХ И БАЗАХ ДАННЫХ ВИНТИ РАН (Г. МОСКВА)

ЖУРНАЛ ПРЕДНАЗНАЧЕН ДЛЯ ИНЖЕНЕРОВ, ЗАНИМАЮЩИХСЯ СОЗДАНИЕМ, ИЗГОТОВЛЕНИЕМ И ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ХОЛОДИЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК, СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ (ГЕЛИЯ, ВОДОРОДА, ОКСИДА И ДИОКСИДА УГЛЕРОДА, СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА И ДР.), ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА, А ТАКЖЕ НАУЧНЫХ РАБОТНИКОВ И СТУДЕНТОВ

РУБРИКИ ЖУРНАЛА

|  |   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>– ПРОБЛЕМЫ КРИОГЕННОГО, КИСЛОРОДНОГО, КОМПРЕССОРНОГО И УГЛЕКИСЛОТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ</li> <li>– ПРОЦЕССЫ, ЦИКЛЫ, СХЕМЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ХОЛОДИЛЬНЫХ И КРИОГЕННЫХ СИСТЕМ</li> <li>– УСТАНОВКИ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПРОДУКТОВ РАЗДЕЛЕНИЯ ВОЗДУХА, КОМПРИМИРОВАННОГО И СЖИЖЕННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА; ДИОКСИДА УГЛЕРОДА И ДР. ТЕХНИЧЕСКИХ ГАЗОВ</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>– ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ В СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ</li> <li>– ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ГАЗОВ И ИХ СМЕСЕЙ. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СИСТЕМАХ</li> <li>– ЭКОНОМИКА ПРЕДПРИЯТИЙ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, БЕЗОПАСНОСТЬ</li> <li>– ПРАКТИКА, НОВЫЕ РАЗРАБОТКИ</li> </ul> |
|--|---|

**Приглашаем к сотрудничеству производителей, учёных, аспирантов и докторантов**

**Для оформления подписки и размещения рекламы нужно связаться с редакцией журнала по телефону или e-mail.**

Адрес редакции: а/я 271, г. Одесса-26, Украина, 65026  
Тел./факс: +380 (48) 777-00-87;  
e-mail: [uasigma@paco.net](mailto:uasigma@paco.net);  
<http://www.uasigma.odessa.ua>

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ**  
Журнал №1 2008

**ТЕХНИЧЕСКИЕ ГАЗЫ**  
Журнал №1 2008