

УДК 665.632.078

Современные тенденции развития энергообменных аппаратов и установок

Д-р техн. наук И. А. АРХАРОВ, д-р техн. наук А. И. СМОРОДИН,
д-р техн. наук В. Ю. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук С. Б. МАЛАХОВ, А. С. МАЛАХОВ*

МГТУ им. Н. Э. Баумана

*E-mail: malakhov_andrey_s@mail.ru

Проведен обзор исследований и технологий, связанных с волновыми энергообменными аппаратами, использующими акустические и ударно-волновые процессы для передачи энергии. Представлена классификация устройств по типу волн, назначению и способам организации энергообмена. Описаны принципы работы и конструкции термоакустических и ударно-волновых установок. Особое внимание уделено термоакустическим системам, включая двигатели, охладители и их объединения в термоакустические пары. Рассмотрены принципы работы пульсационных, роторно-волновых и резонансных охладителей газа, а также их применение в охлаждении, сжатии газов, эжекции и разделении потоков. Изложены инженерные подходы к повышению эффективности: использование многоступенчатых систем, оптимизация конструкций. Приведены примеры применения роторно-волновых технологий в криогенной промышленности для ожижения метана и создания экологически чистых холодильных циклов. Обсуждаются перспективы использования волновых роторных технологий в энергетике и промышленности. Статья содержит рекомендации по исследованиям и конструктивным решениям для снижения потерь и повышения эффективности энергообменных аппаратов.

Ключевые слова: волновые энергообменные аппараты, акустические энергообменные аппараты, ударно-волновые энергообменные аппараты, волновые технологии, роторные технологии.

Информация о статье:

Поступила в редакцию 11.12.2024, одобрена после рецензирования 20.02.2025, принята к печати 28.02.2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-3-13

Язык статьи — русский

Для цитирования:

Архаров И. А., Смородин А. И., Семенов В. Ю., Малахов С. Б., Малахов А. С. Современные тенденции развития энергообменных аппаратов и установок. // Вестник Международной академии холода. 2025. № 2. С. 3–13. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-3-13

Current trends in the development of energy exchange apparatus and units

D. Sc. I. A. ARKHAROV, D. Sc. A. I. SMORODIN,
D. Sc. V. Y. SEMENOV, Ph. D. S. B. MALAKHOV, A. S. MALAKHOV*

Bauman Moscow State Technical University

*E-mail: malakhov_andrey_s@mail.ru

This paper reviews research and technologies related to wave energy exchangers that use acoustic and shock-wave processes to transfer energy. It presents a classification of devices by wave type, purpose, and methods of energy exchange organization. Operating principles and designs of thermoacoustic and shock-wave units are described. Particular attention is paid to thermoacoustic systems, including engines, coolers, and their combinations into thermoacoustic pairs. We consider operating principles of pulsation, rotary-wave, and resonant gas coolers, as well as their application in cooling, compression of gases, ejection, and flow separation. The paper presents engineering approaches to improving efficiency: the use of multistage systems and optimization of designs. Examples of rotary-wave technologies in the cryogenic industry for methane liquefaction and the creation of environmentally friendly refrigeration cycles are given. The prospects for using wave rotor technologies in power engineering and industry are discussed. The article contains recommendations for research and design solutions to reduce losses and improve the efficiency of energy exchangers.

Keywords: wave energy exchangers, acoustic energy exchangers, shock-wave energy exchangers, wave technologies, rotor technologies.

Article info:

Received 11/12/2024, approved after reviewing 20/02/2025, accepted 28/02/2025

DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-3-13

Article in Russian

For citation:

Arkharov I. A., Smorodin A. I., Semenov V. Y., Malakhov S. B., Malakhov A. S. Current trends in the development of energy exchange apparatus and units. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2025. No 2. p. 3–13. DOI: 10.17586/1606-4313-2025-24-2-3-13

Введение

Существующая литература демонстрирует большое количество исследований в области волновых машин, но не рассматривает весь спектр данного вида устройств. Исследователи сосредотачиваются на определенных технологиях и областях применения.

В частности, в работе [1] проведено наиболее обширное исследование роторно-волновой технологии энергообменных устройств, но практически не уделено внимание применению этой технологии в области генерации холода и рассмотрены исследования, проведенные только в странах Европы, Японии и США. В работах [2]–[4], наоборот, основное внимание уделялось получению холода и работам проводимым на территории СССР и современной Российской Федерации. Так же в последние 5 лет появились совершенно новые работы независимых исследователей из Китая [5]–[7]. При этом акустические и ударно-волновые устройства не рассматриваются совместно, несмотря на то что это два частных случая применения механических волн [8]–[14].

Основная цель исследования — провести систематизацию существующих знаний о волновых энергообменных аппаратах, их классификацию по типу волн, способам организации энергообмена и областям применения, с учетом последних достижений в области. Решение поставленной задачи позволит не только обобщить теоретические основы, но и выявить перспективные направления развития волновых технологий для практического применения в энергетике и промышленности.

Классификация волновых энергообменных аппаратов

Волновые энергообменные аппараты представляют собой устройства, в которых процессы энергообмена

осуществляются в каналах за счет акустических или ударных волн. Эти волны, обеспечивая передачу энергии, различаются по амплитуде, частоте и степени нелинейности колебаний рабочего тела. Предлагается классифицировать волновые энергообменные аппараты по типу механических волн. Ударные и акустические волны отличаются характеристиками и как правило способом генерации.

На рис. 1 представлена схема классификации по типу волн, области применения и способу организации энергообмена.

1. Акустические энергообменные аппараты

В основе большинства акустических энергообменных аппаратов лежит термоакустический эффект или принцип Рэлея: «Если газу передать тепло в момент максимального сжатия или отобрать тепло в момент максимального разрежения, это стимулирует колебания» [8]. Прямой термоакустический эффект (генерация акустических волн путем создания температурного напора между горячим и холодным теплообменниками) используется в термоакустических двигателях (ТАД). Обратный эффект (нагрев и охлаждение со стороны горячего и холодного теплообменника благодаря генерируемым акустическим колебаниям) применяется в термоакустических охладителях (или термоакустических холодильниках, ТАХ).

Также исследуются микро-эжекторы, использующие акустические эффекты [9, 10]. Однако акустические волны нашли наибольшее применение в системах охлаждения [11]–[16]. Изоентропный КПД таких установок достигает 50% и выше. Использование ТАД и ТАХ совместно (термоакустические пары, ТАП) позволяет исключить подвижные части, повышая надежность работы оборудования.

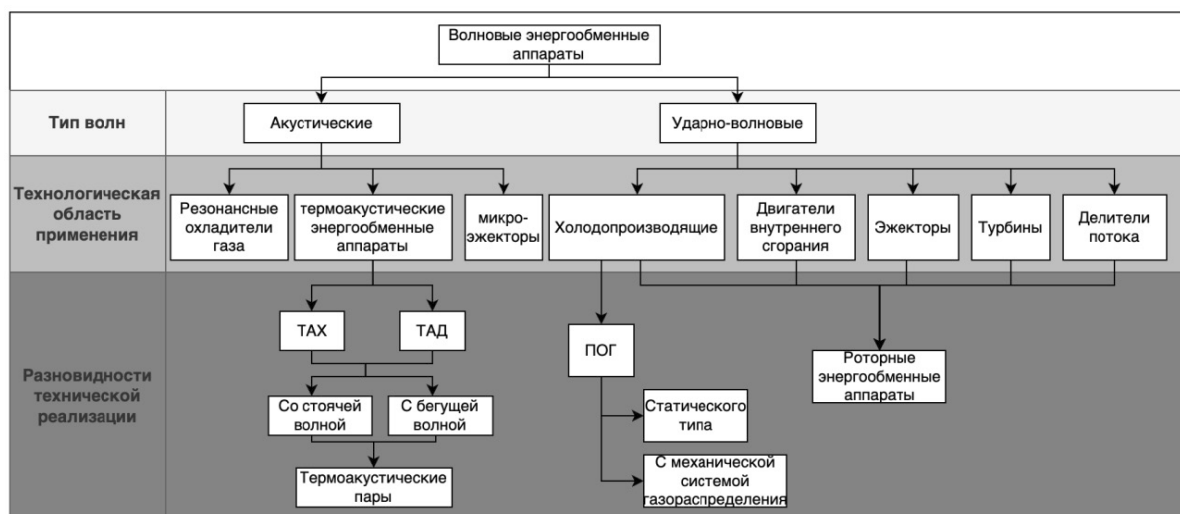


Рис. 1. Классификация волновых энергообменных аппаратов

Fig. 1. Classification of wave energy exchangers

1.1. Термоакустические охладители и двигатели.

Термоакустические эффекты широко применяются в технологических процессах. В работе [14] рассмотрено использование ТАД, работающих по циклам Брайтона и Стирлинга, а в [17] описаны численные методы моделирования акустических волн в ТАД.

Главное отличие между ТАД и ТАХ заключается в направлениях передачи энергии. На рис. 2 представлены схемы ТАД (а), ТАХ (б) с бегущей, ТАД (в), ТАХ (г) со стоячей акустическими волнами.

Для охлаждения в ТАХ требуется подвод энергии Q_x через холодный теплообменник (ХТО) и отвод тепла Q_r через горячий теплообменник (ГТО). В ТАД, наоборот, энергия Q_r подводится от источника (например, сжигание топлива), а тепло Q_x отводится через ХТО.

Основные элементы ТАД и ТАХ включают регенератор (пористые или сетчатые структуры) между ГТО и ХТО, обеспечивающий температурные градиенты. Материал и параметры регенератора существенно влияют на эффективность работы [18]. Установки с бегущей волной (рис. 2 а, б) используют замкнутый резонатор, а со стоячей волной (рис. 2 в, г) — линейный. При этом установки с бегущей волной более эффективны.

В качестве генераторов волн в ТАХ применяются поршни или мембраны, например, динамики [16] (рис. 3).

Для повышения эффективности в подобных системах применяются байпас-системы (системы с обратной связью по бегущей волне) [19], рис. 4.

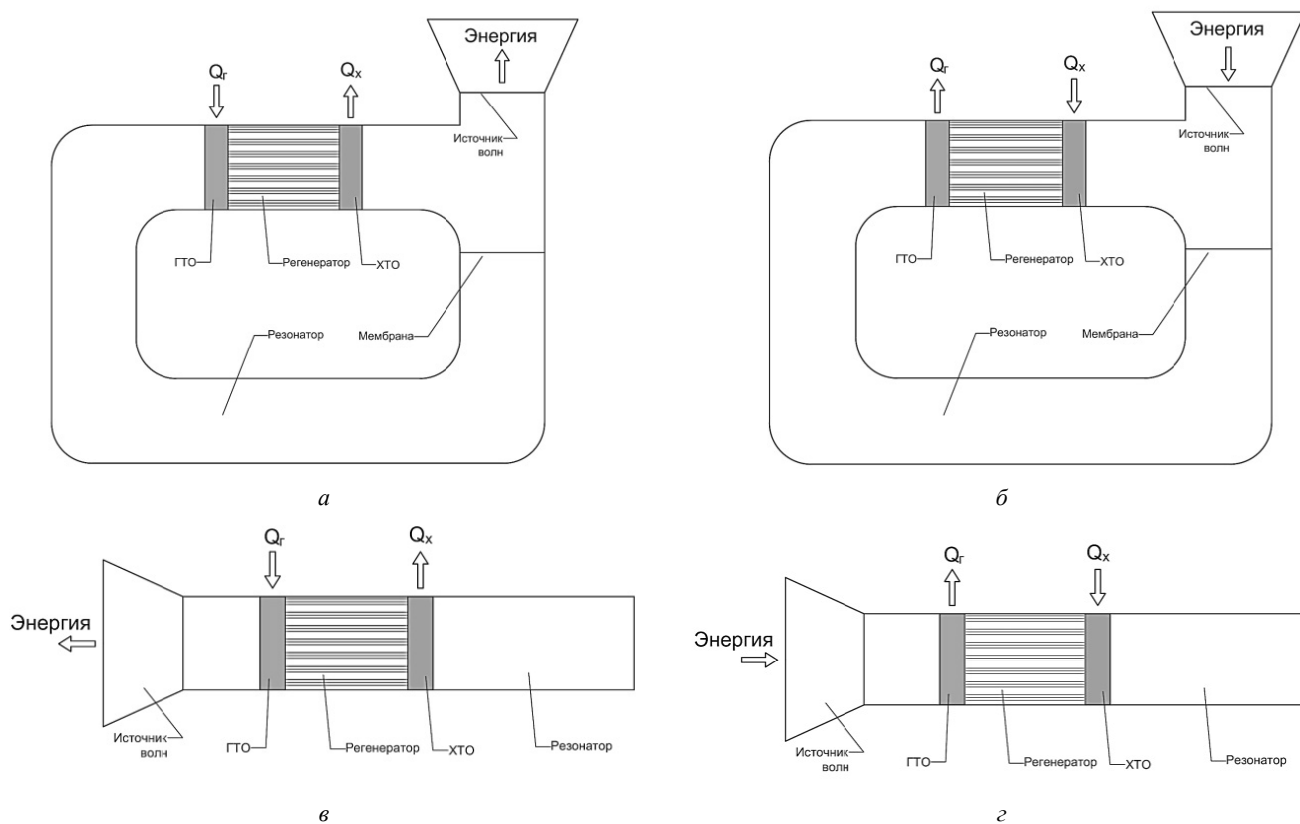


Рис. 2. Схемы ТАХ и ТАД со стоячей и бегущей акустической волной

Fig. 2. Schemes of thermoacoustic engines and refrigerators with standing and traveling acoustic wave



Рис. 3. ТАХ с динамиком в качестве источника акустических волн

Fig. 3. Thermoacoustic refrigerator with a loudspeaker as a source of acoustic waves

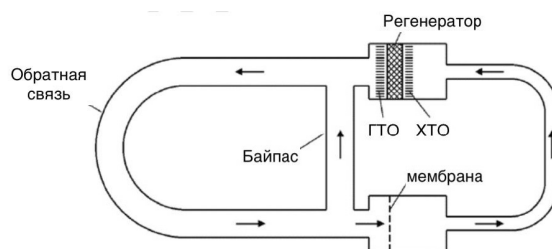


Рис. 4. Гибридная геометрия с обратной связью по бегущей волне

Fig. 4. Hybrid geometry with traveling-wave feedback

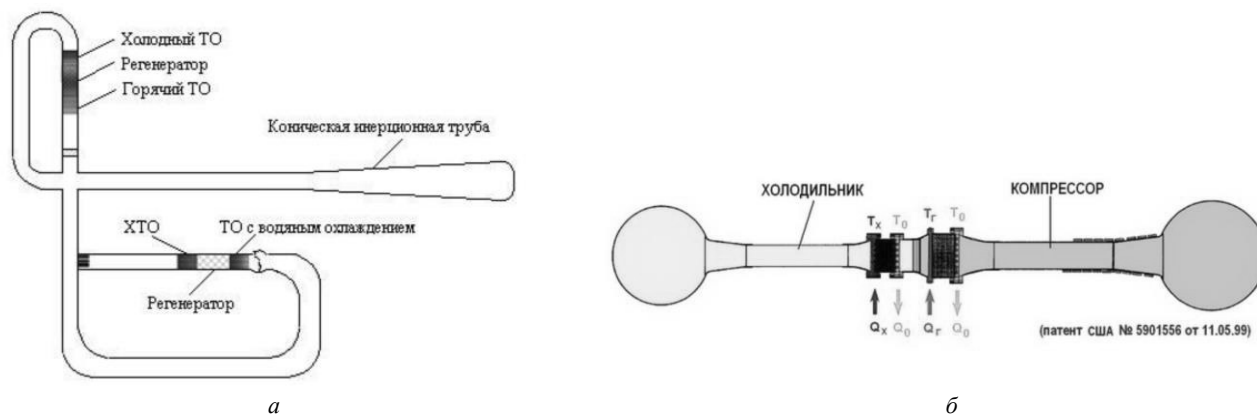


Рис. 5. Схемы ТАП: а — ТАХ приводимый ТАД по циклу Стирлинга с бегущей волной;
б — ТАХ приводимый ТАД со стоячей волной

Fig. 5. Schemes of thermoacoustic couples:
а — Thermoacoustic refrigerators driven by thermoacoustic engine on the Stirling cycle with travelling wave;
б — Thermoacoustic refrigerators driven by thermoacoustic engine with standing wave

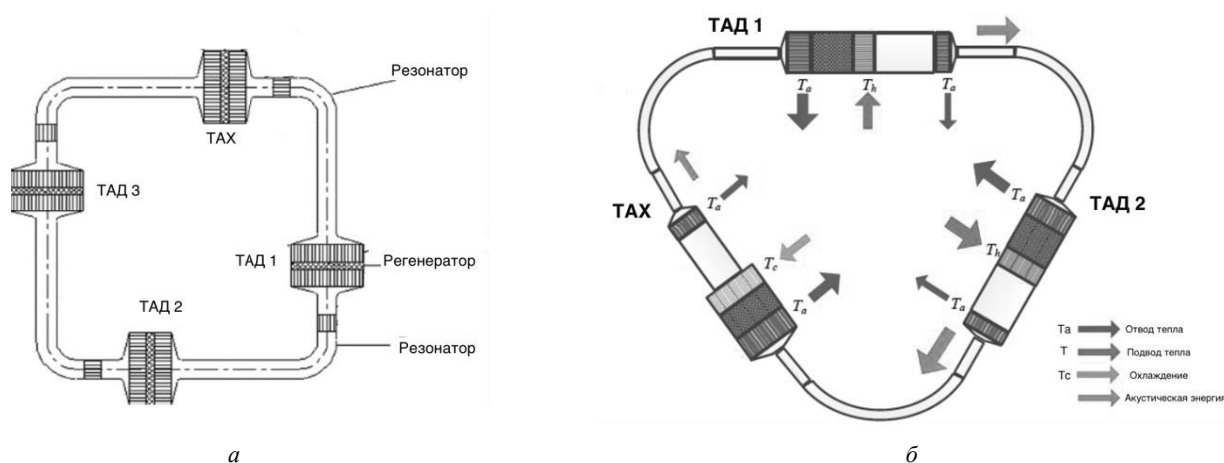


Рис. 6. Многоступенчатые ТАД для привода ТАХ: а — трехступенчатый ТАД для привода ТАХ;
б — двухступенчатый ТАД для привода ТАХ

Fig. 6. Multistage thermoacoustic engines to drive thermoacoustic refrigerator:
а — three-stage thermoacoustic engine to drive thermoacoustic refrigerator;
б — two-stage thermoacoustic engine to drive thermoacoustic refrigerator

1.2. Термоакустические пары.

Для работы ТАХ необходимы акустические волны, которые могут генерироваться ТАД. Объединение этих систем в одну установку, называемую термоакустической парой (ТАП), позволяет устранить промежуточные устройства и избежать потерь при преобразовании акустической энергии в механическую и обратно.

ТАП, как и самостоятельные установки, различаются по типу акустической волны: стоячая (рис. 5, б [20]) или бегущая (рис. 5, а [21]).

Для повышения эффективности таких систем инженеры начали использовать многоступенчатые двигатели в замкнутых контурах, что позволило сократить размеры резонаторов и улучшить передачу энергии от ТАД к ТАХ.

В 2016 г. специалистами из Китая [19] представлен трехступенчатый ТАД для привода ТАХ (рис. 6, а), а в 2017 г. — двухступенчатый ТАД для аналогичной цели [22] (рис. 6, б).

1.3. Резонансные охладители газа.

Газоструйные волновые генераторы — это аэродинамические звукогенерирующие устройства, основанные на пульсирующем течении газа при торможении сверхзвуковой недорасширенной струи препятствием, таким как полый резонатор или плоская стенка. При заданном перепаде давления существуют оптимальные размеры генератора, обеспечивающие максимальную акустическую мощность. Источником энергии, поддерживающим автоколебания, служит энергия потока расширяющегося газа. Частота акустических колебаний определяется параметрами системы «сопло — резонатор».

Для резонансных охладителей газа важен выбор оптимальной геометрии энергообменного канала. В работе [2] рассмотрены волновые охладители с эллипсоидной (рис. 7, а) и параболоидной рабочей камерой (рис. 7, б).

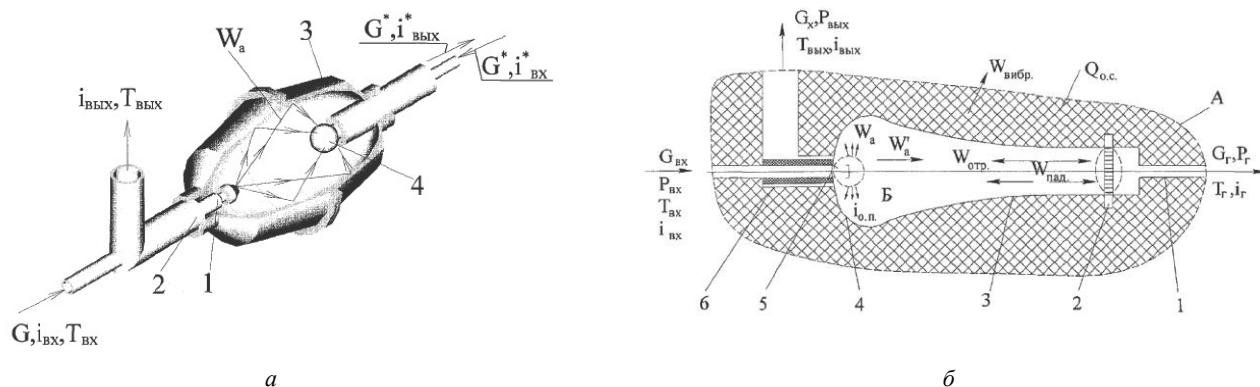


Рис. 7. Схемы резонансных охладителей газа: а — с эллипсоидным энергообменным каналом: 1 — газоструйный излучатель, 2 — сборник расширенного газа, 3 — адиабатный эллипсоидный концентратор, 4 — поглотитель волновой энергии (пористая медь); б — с параболическим энергообменным каналом

Fig. 7. Schemes of resonant gas coolers: a — cooler with ellipsoidal energy exchange channel: 1 — gas jet radiator, 2 — expanded gas collector, 3 — adiabatic ellipsoidal concentrator, 4 — wave energy absorber (porous copper); b — cooler with paraboloidal energy exchange channel

2. Ударно-волновые энергообменные аппараты

В 2013 г. в работе [3] был представлен обзор энергообменных аппаратов, с акцентом на холодопроизводящие установки. Классификация, предложенная Малаховым С. Б., стала основой для классификации на рис. 1. В обзоре основное внимание уделено исследованиям, проведенным на территории стран СНГ.

2.1. Пульсационные охладители газа.

Подробный обзор пульсационных охладителей газа (ПОГ) представлен в работах [3, 4] Малахова С. Б. и Семенова В. Ю. на базе МГТУ им. Н. Э. Баумана. В данной статье приведена краткая информация для описания существующих волновых аппаратов.

Основой энергообмена в ПОГ является генерация падающей ударной волны (ПУВ), при которой газ высокого давления (активный газ) сжимает газ низкого давления (пассивный газ), передавая ему энергию и охлаждаясь. К ПОГ статического типа относятся конструкции пульсационных трубок, систематизированные в работах А. М. Архарова, В. Л. Бондаренко и Ю. М. Симоненко [23], что остается актуальным и сегодня (рис. 8).

Основным недостатком конструкций, приведенных на рис. 8, а, является невозможность регулирования и низкий КПД (до 30–40%) из-за нагрева концов пульсационных трубок и необходимости отвода тепла. Для устранения этих недостатков были разработаны ПОГ с механической системой распределения (рис. 8, б), позволяющие оптимизировать параметры волновой картины в энергообменном канале.

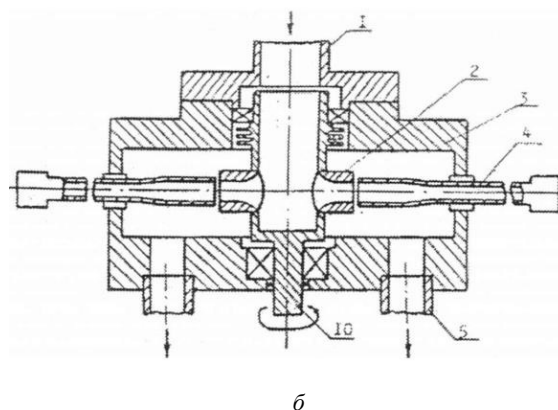
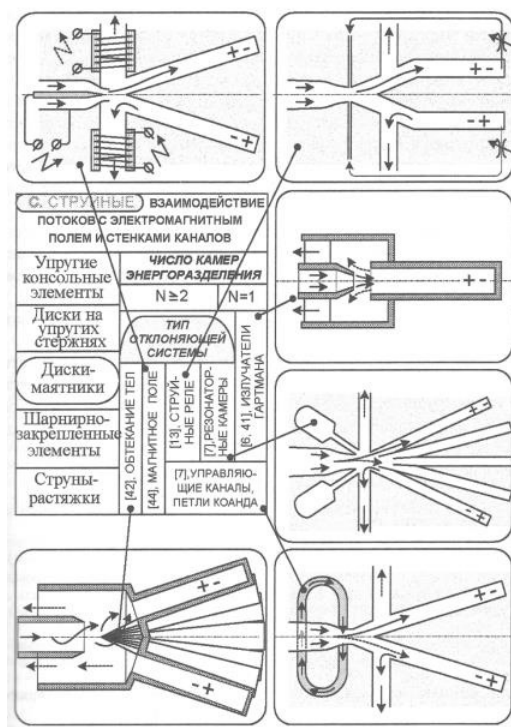


Рис. 8. Сепараторы энергии на основе струйных аппаратов (ПОГ)

Fig. 8. Energy separators based on jet apparatuses (pulsation gas coolers)

2.2. Роторные волновые энергообменные аппараты.

Применение ротора в процессах энергообмена отличается высокой эффективностью и простотой конструкции, что обеспечивает его использование в системах охлаждения, турбинах, наддуве, повышении давления сгорания (роторно-волновая камера сгорания) и эжекторах (рис. 9).

В работе [1], проведенной на базе Массачусетского технологического университета, рассмотрены возможности использования роторных волновых энергообменных аппаратов, главным образом, для двигателей внутреннего сгорания и турбин в Европе, США и Японии.

Специалисты из Китая активно изучают и тестируют эжекторные установки роторно-волнового типа [5]–[7]. В области охлаждения роторно-волновая технология применяется как самостоятельное расширительное устройство (роторно-волновой детандер или РВКГ [3, 4, 24]), так и как часть холодильного цикла для повышения давления конденсации.

2.2.1. Волновые роторы в области получения холода.

Роторно-волновой криогенератор (РВКГ) — это пример применения волновой роторной технологии в системах охлаждения в качестве волнового детандера при низких температурах. Исследования РВКГ проводились в 1990–2000 гг. в ООО «ГАЗПРОМ ВНИИгаз» и в 2010-х годах в МГТУ им. Н. Э. Баумана и ПК НПФ «ЭКИП» [3, 4]. Основной целью было применение этой технологии в установках сжижения метана в холодильной (ВНИИ-ГАЗ) и криогенной (МГТУ им. Н. Э. Баумана, ЭКИП) областях. Основное внимание уделялось 4-х сопловым конструкциям с замкнутым циклом пассивного газа. Был достигнут КПД 70–80 % в теплой области температур и 50–60 % в криогенной, с возможным увеличением до 70–80 % и выше при реализации режима высоконапорной продувки [24]. Так же большой вклад в исследование волновых детандеров внесли Козлов А. В. и Лаухин Ю. А. в том числе исследовались волновые детандеры с энергообменными каналами переменного сечения [25]–[28].

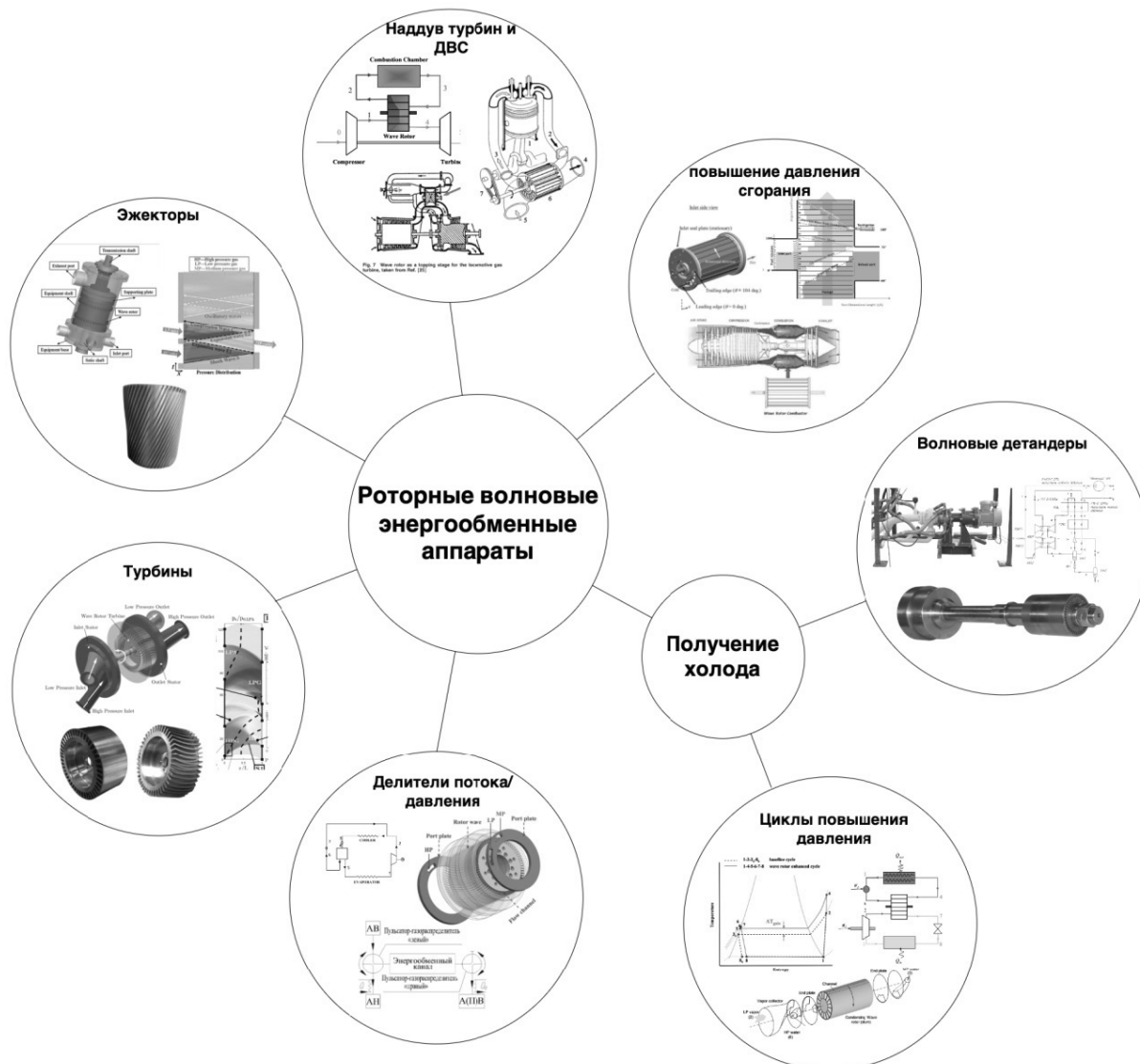


Рис. 9. Области применения роторно-волновых технологий

Fig. 9. Areas of application of rotor-wave technology

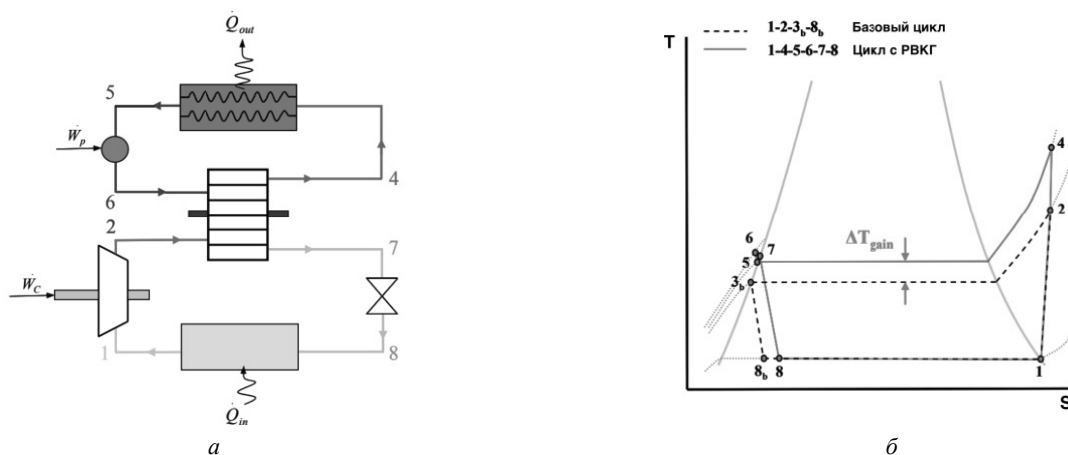


Рис. 10. Холодильный цикл с применением 4-х соплового волнового ротора

Fig. 10. Refrigeration cycle using a 4-nozzle wave rotor

В 2000–2008 гг. в Мичиганском технологическом университете изучалось применение волновых роторов в холодильных циклах [29]. В рамках экологической повестки внимание было сосредоточено на использовании экологически чистых хладагентов, таких как H_2O [26] и CO_2 [30], безопасных для пищевой промышленности. На рис. 10, б показан цикл на хладагенте R718 (вода) на T-S-диаграмме в сравнении с базовым холодильным циклом.

Одним из отличий роторно-волновых детандеров от турбодетандеров является возможность работы с насыщенной жидкой фазой и осуществление фазового перехода в рабочих каналах. В работе [4] было зафиксировано образование парожидкостной фазы на выходе из РВКГ, а в [31] описано использование воды под высоким давлением и низкой температурой для сжатия и конденсации газа в энергообменном канале. Фазовые переходы в каналах РВКГ также исследовались экспериментально и моделировались учеными из Китая [32].

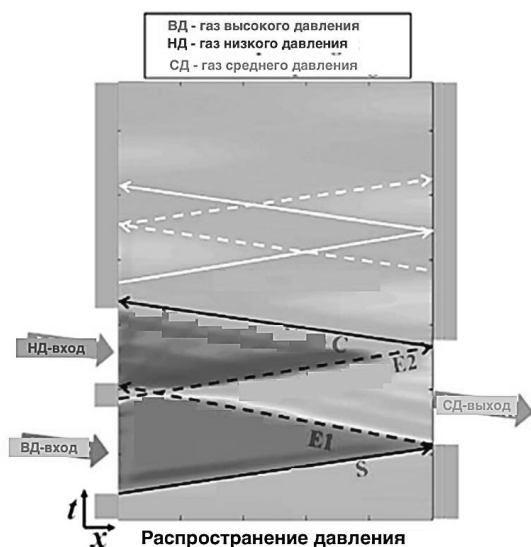


Рис. 11. Волновая схема работы волнового эжектора

Fig. 11. Wave scheme of wave ejector operation

2.2.2. Роторно-волновые эжекторы.

Исследования роторно-волновых технологий охватывают множество применений, включая двигатели и турбины. Менее изученной остается область использования волновых роторов в качестве эжекторов [3, 6]. Волновая схема работы такого эжектора представлена на рис. 11.

Принцип работы роторно-волнового эжектора основан на формировании волновой картины в энергообменном канале для подкачки пассивного газа низкого давления и его смешения с активным газом высокого давления (рис. 11). Активный газ поступает в канал, создавая падающую ударную волну S , сжимающую пассивный газ. При открытии сопла среднего давления возникает волна расширения $E1$, ускоряющая газ для отвода через сопло. Волна разрежения $E2$ характеризует распространение области пониженного давления, благодаря чему обеспечивается приток пассивного газа и его смешение с активным.

Для повышения эффективности работы эжектора используются профилированные каналы ротора (рис. 12). Конструкция волнового эжектора представлена на рис. 13.



Рис. 12. Ротор волнового эжектора с профилированными каналами

Fig. 12. Wave ejector rotor with profiled channels

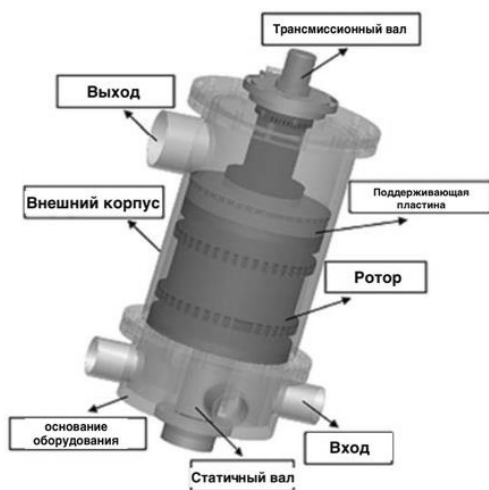


Рис. 13. Конструкция волнового эжектора

Fig. 13. Wave ejector

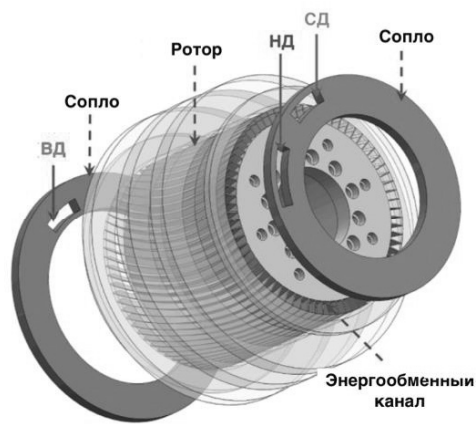


Рис. 14. 3D-модель роторно-волнового сепаратора давлений

Fig. 14. 3D model of rotary wave pressure separator

2.2.3. Роторно-волновые сепараторы давления

Роторно-волновые сепараторы давления (или делители давления, делители потока) имеют такое же количество сопел как и роторно-волновые эжекторы, но в отличие от эжектора, сепаратор имеет только один входящий поток (среднего давления) и два выходящих (низкого и высокого давления) в работе [33] представлена 3D-модель конструкции (рис. 14).

Газ высокого давления сжимается на 10–20% относительно среднего давления, а газ низкого давления расширяется в 1,82 раза. Расход газа высокого давления составляет до 37,6% от потока среднего давления.

Такие устройства предлагается использовать для разделения потоков между конечными потребителями и линиями сжатия (рис. 15).

Выводы

Подводя итоги, следует отметить, что волновые энергообменные аппараты являются молодой и активно развивающейся областью, особенно в последние пять лет в Китае. Эти устройства находят применение в задачах

повышения давления сгорания в ДВС, получения холода, разделения потоков и эжекции.

Наиболее перспективными являются термоакустические пары (ТАП) и роторно-волновые энергообменные аппараты. ТАП отличаются простотой и надежностью, что делает их подходящими для систем с высокими требованиями к надежности. Роторные технологии демонстрируют наивысшую энергоэффективность среди волновых энергообменных аппаратов (КПД в области получения холода достигает 50–80%) и превосходят классические аппараты (турбодетандеры, эжекторы) по надежности и простоте конструкции.

Широкое коммерческое применение роторно-волновой технологии еще не началось. Основное препятствие — сложность моделирования нестационарных течений в энергообменных каналах, требующая проведения большого числа экспериментов. Разработка первых промышленных образцов для коммерческого применения может предоставить исследователям уникальные рыночные преимущества, практически без конкуренции.

Отдельно стоит выделить преимущества РВКГ, особенно при работе с низкой степенью расширения (при

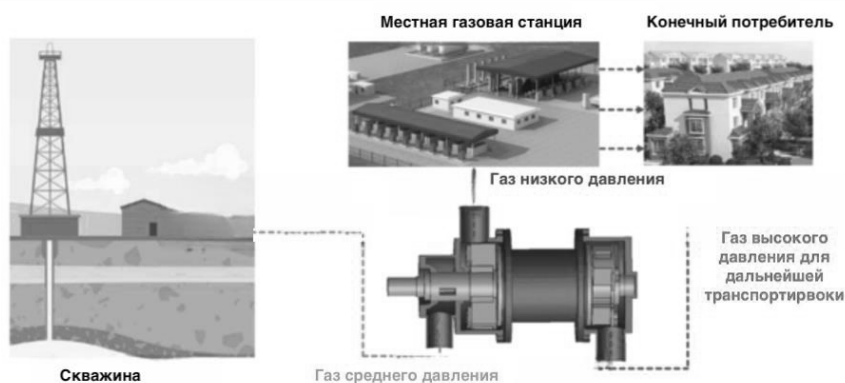


Рис. 15. Предлагаемая схема включения роторно-волнового сепаратора давлений в линию добычи природного газа

Fig. 15. Proposed scheme for incorporating a rotary wave pressure separator into a natural gas production line

расширении активного газа в 1,5–2,5 раза). В этом случае адиабатный КПД расширения становится сопоставимым с классическими турбодетандерами (60–80% и более), при общем уменьшении капитальных затрат на производство расширительного устройства. Это связано с тем, что РВКГ работает при меньших оборотах ротора (2000–10000 об/мин), чем турбодетандер (30000 > об/мин) и не требует применения специальных подшипников, устройства фундамента. Так же РВКГ из-за конструкции менее чувствителен к загрязнениям и может работать при наличии твердых фракций, жидкой фазы в рабочих каналах.

Литература/References

1. Pezhman Akbari Razi Nalim Norbert Mueller. A Review of Wave Rotor Technology and Its Applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. October 2006, Vol. 128. P. 717–735. DOI: 10.1115/1.2204628
2. Бондаренко В. Л. Создание и исследование волновых криогенераторов и их применение в технологии получения неона высокой чистоты: дис....док. техн. наук. М. 2003. 294 с. [Bondarenko V. L. Creation and research of wave cryogenerators and their application in the technology of high purity neon production: dissertation of the Doctor of Technical Sciences, Moscow, 2003. 294 p. (in Russian)]
3. Малахов С. Б. Разработка и исследование роторного волнового криогенератора для установок сжижения природного газа. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 2013. [Malakhov S. B. Development and research of a rotary wave cryogenerator for natural gas liquefaction plants. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences. 2013. (in Russian)]
4. Семенов В. Ю. Разработка и исследование высокоэффективных малотоннажных установок сжижения природного газа: дис. ... д. т. н. М. 2016. 331 с. [Semenov V. Y. Development and research of highly efficient low-tonnage natural gas liquefaction plants: Dissertation, Doctor of Technical Sciences, Moscow, 2016. 331 p. (in Russian)]
5. Yiming Zhao et al. Numerical Simulation Research on the Effect of the Rotor Passage Cross-Sectional Dimension on the Performance of Gas Wave Ejector. *Journal of Physics: Conference Series*. 2329 (2022) 012026. DOI: 10.1088/1742-6596/2329/1/012026
6. Yiming Zhao, Haoran Li and Dapeng Hu. Performance experiments with a gas wave ejector equipped with curved channels and an analysis of the influence of channel angles. *RSC Adv.*, 2022, 12, pp. 17294–17311. DOI: 10.1039/d2ra02577a
7. Nalim M. R., Izzy Z. A., Akbari P. Rotary wave-ejector enhanced pulse detonation engine. *Shock Waves*. 2011: 22 (1). DOI: 10.1007/s00193-011-0348-5
8. Вережчагина Т. Н., Михеев А. С., Кудряева Ю. В. Термоакустический эффект и его применение // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2021. № 2. С. 127–138. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-2-127-138 [Vereshchagina T. N., Mikheev A. S., Kudryavtseva Yu. V. Thermoacoustic effect and its application. Series: Nuclear reactor constants. 2021. No. 2. pp. 127–138. DOI: 10.55176/2414-1038-2021-2-127-138 (in Russian)]
9. Jia Ning, Yulin Lei, Hong Hu and Chenhui Gai. A Comprehensive Review of Surface Acoustic Wave-Enabled Acoustic Droplet Ejection Technology and Its Applications. *Micromachines*. 2023, 14, 1543.
10. Yuan Ning, Menglun Zhang, Hongxiang Zhang, Xuexin Duan, Yi Yuan, Buohua Liua, Wei Pang. Mechanism and stability investigation of a nozzle-free droplet-on-demand acoustic ejector. *Analyst*, 2021, 146, 5650–5657.
11. K. Augustine Babu, P. Sherjin. A Critical Review on Thermoacoustic Refrigeration and its Significance. *International Journal of ChemTech Research*. 2017. Vol. 10, No. 7, pp. 540–552.
12. Alcock A. C., Tartibu L. K. and Jen T. C. Design and construction of a thermoacoustically driven thermoacoustic refrigerator. *International Conference on the Industrial and Commercial Use of Energy (ICUE)*. 2017. IEEE proceedings.
13. Vraj S. Shah, Ankit K. Parekh, Kush T. Pandya, Meet R. Bhavsar. Analysis of Thermo-Acoustic Refrigeration System. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2021. Vol. 08, Issue 08, pp 800–805.
14. Tartibu L. K. Developing more efficient travelling-wave thermo-acoustic refrigerators: A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2019. Vol. 31, pp. 102–114.
15. K. Augustine Babu, P. Sherjin. Experimental investigations of the performance of a thermoacoustic refrigerator based on the Taguchi method. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2018. 32 (2): 929–935. DOI: 10.1007/s12206-018-0143-x
16. Raut A. S., et al. Review of investigations in eco-friendly thermoacoustic refrigeration system. *Thermal science*. 2017, Vol. 21, No. 3, pp. 1335–1347.
17. Mohammed Noorul Hussain, Isam Janajreh. Analysis of pressure wave development in a thermo-acoustic engine and sensitivity study. *Energy Procedia*. 2017. vol. 142. Pp. 1488–1495.
18. Tartibu L. K. A sustainable solution for refrigeration using thermo-acoustic technology. *International Conference on the Domestic Use of Energy (DUE)*. March 2016. DOI: 10.1109/DUE.2016.7466714
19. Zhang, X., Chang, J., Cai, S. and Hu, J., 2016. A multi-stage travelling wave thermoacoustic engine driven refrigerator and operation features for utilizing low grade energy. *Energy Conversion and Management*, 114, pp. 224–233.
20. High-efficiency heat-driven acoustic cooling engine with no moving parts. The US patent. no. 5901556 from 05/11/99.
21. Белозерцев В. Н., Пулькина А. Ю. Проблемы и перспективы систем охлаждения с термоакустическим приводом // Вестник Международной академии холода. 2017. No 3. С. 41–46. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-41-46 [Belozertsev W. N., Pulkina A. Yu. Heat-driven thermoacoustic refrigerators: issues and prospects. *Journal of International Academy of Refrigeration*. 2017. No 3. p. 41–46. DOI: 10.21047/1606-4313-2017-16-3-41-46 (in Russian)]
22. Luo K., Sun D. M., Zhang J., Shen Q. and Zhang N., A multi-stage traveling-wave thermoacoustically-driven refrigeration system operating at liquefied natural gas temperature. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 278, No. 1, p. 012139.
23. Архаров А. М., Бондаренко В. Л., Симоненко Ю. М. Систематизация пульсаторов, используемых для привода газодинамических аппаратов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2010. С. 97–110. [Arkharov A. M., Bondarenko V. L., Simonenko Yu. M. Syst

- ematization of pulsators used to drive gas-dynamic devices. *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser. Mechanical Engineering*. 2010. p. 97–110. (in Russian)]
24. Архаров А. М. Высокоэффективный роторный волновой криогенератор / А. М. Архаров, И. А. Архаров, В. Ю. Семенов, С. Б. Малахов, А. С. Малахов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2020. № 2. С. 21–25. [Arkharov A. M. Highly efficient rotary wave cryogenerator / A. M. Arkharov, I. A. Arkharov, V. Y. Semenov, S. B. Malakhov, A. S. Malakhov. *Chemical and oil and gas engineering*. 2020. No. 2. pp. 21–25. (in Russian)]
 25. Козлов А. В., Бобров Д. М., Лаухин Ю. А. Волновой детандер с энергообменными каналами переменной площади сечения // Химическое и нефтяное машиностроение. 2000. № 11. С. 27–29. [Kozlov A. V., Bobrov D. M., Laukhin Yu. A. Wave expander with energy exchange channels of variable cross-sectional area. *Chemical and petroleum engineering*. 2000. No. 11. pp. 27–29. (in Russian)]
 26. Лаухин Ю. А., Бобров Д. М. Анализ результатов исследования аппаратов пульсационного охлаждения газа // Научн. труды ВНИИГАЗ. Новое оборудование и технология процессов подготовки и переработки газа и конденсата. 1981. С. 96–108. [Laukhin Yu. A., Bobrov D. M. Analysis of the results of the study of pulsation gas cooling devices. *Scientific proceedings of VNIIGAZ. New equipment and technology for the preparation and processing of gas and condensate*. 1981. pp. 96–108. (in Russian)]
 27. Козлов А. В., Лаухин Ю. А. Разработка и исследования волновых детандеров // Каталог научно-технических разработок молодых специалистов 1994–1997 г. Конкурс 96 г. ВНИИГАЗ. 96 с. [Kozlov A. V., Laukhin Yu. A. Development and research of wave expanders. Catalog of scientific and technical developments of young specialists 1994–1997. 96 VNIIGAZ competition. 96 p. (in Russian)]
 28. Бобров Д. М., Козлов А. В., Лаухин Ю. А. Расчетно-теоретические и экспериментальные исследования волновых детандеров // Новые технологии газовой промышленности: Тез. докл. Четвертой Всероссийской конф. молодых ученых, специалистов и студентов по проблемам газовой промышленности России. РГУ им. И. М. Губкина. Москва. 2001. 43 с. [Bobrov D. M., Kozlov A. V., Laukhin Yu. A. Computational, theoretical and experimental studies of wave expanders. New technologies of the gas industry: Thesis. dokl. *The Fourth All-Russian Conference of Young Scientists, specialists and students on the problems of the Russian gas industry*. Gubkin Russian State University. Moscow. 2001. 43 p. (in Russian)]
 29. Pezhman Akbari, Amir A. Kharazi, Norbert Müller 2003, Utilizing wave rotor technology to enhance the turbo compression in power and refrigeration cycles. *Proceedings of IMECE'03 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition Washington, D. C., November 16–21, 2003*.
 30. Ahmed Elatar, Brian Fricke, Vishaldeep Sharma and Kashif Nawaz. Pressure exchanger for energy recovery in a trans-critical CO₂ refrigeration system. *Energies*. 2021, 14, 1754. <https://doi.org/10.3390/en14061754>
 31. Amir A. Kharazi, Pezhman Akbari and Norbert Müller Michigan State University, East Lansing, MI, 48824. An Application of Wave Rotor Technology for Performance Enhancement of R718 Refrigeration Cycles 2nd International Energy Conversion Engineering Conference 16–19 August 2004, Providence, Rhode Island.
 32. Peiqi Liua, b, Xiang Li a, Xinyu Liua, Mingyu Fenga, Yang Yua, Dapeng Hua, Ming Dao. 2021 Investigation on non-equilibrium phase transition in wave rotor. *International Journal of Refrigeration*. 2021. 124:96–104. DOI: 10.1016/j.ijrefrig. 2020.12.015
 33. Yawen Ji, Qing Feng, Jianli Wang, Yang Yu, Dapeng Hu. Performance enhancement on the three-port gas pressure dividing device by flow channel optimization of wave rotor. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2024:205:109972.

Сведения об авторах

Архаров Иван Алексеевич

Д. т. н., профессор кафедры Э4 — «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, Лefortovskaya наб., 1, ivanarkharov@yahoo.com, SPIN-код: 9674–4585, AuthorID: 262941, ORCID: 0000-0002-1624-171X

Сморodin Анатолий Иванович

Д. т. н., профессор кафедры Э4 — «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, Лefortovskaya наб., 1; заместитель директора Инновационного научно-технического центра ОАО «Криогенмаш», 143907, Россия, Московская обл., г. Балашиха, пр. Ленина, 67, SPIN-код: 5585–4846, AuthorID: 438969, ORCID: 0000-0003-1393-6871

Семенов Виктор Юрьевич

Д. т. н., кафедра Э4 — «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва, Лefortovskaya наб., 1, SPIN-код: 2475–2537, AuthorID: 797917, ORCID: 0009-0005-7832-531X

Information about authors

Arkharov Ivan A.

D. Sc., Professor of Department E4 — Cryogenic Refrigeration, Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, 1 Lefortovskaya nab., Moscow, 105005, Russia, ivanarkharov@yahoo.com, SPIN-код: 9674–4585, AuthorID: 262941, ORCID: 0000-0002-1624-171X

Smorodin Anatoly I.

D. Sc., Professor of Department E4 — Cryogenic Refrigeration, Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, 1 Lefortovskaya nab., Moscow, 105005, Russia; Deputy Director of the Innovative Scientific and Technical Center of JSC Cryogenmash, 67 Lenin Ave., Balashikha, 143907, Moscow Region, Russia, SPIN-код: 5585–4846, AuthorID: 438969, ORCID: 0000-0003-1393-6871

Semenov Viktor Y.

D. Sc., Professor of Department E4 — Cryogenic Refrigeration, Life Support Systems, Bauman Moscow State Technical University, 1 Lefortovskaya nab., Moscow, 105005, Russia, SPIN-код: 2475–2537, AuthorID: 797917, ORCID: 0009-0005-7832-531X

Малахов Сергей Борисович

К. т. н., МГТУ им. Н. Э. Баумана,
105005, Москва, Лefortovskaya nab., 1,
ORCID: 0009-0007-3603-7824

Malakhov Sergey B.

Ph. D., Bauman Moscow State Technical University, 1
Lefortovskaya nab., Moscow, 105005, Russia,
ORCID: 0009-0007-3603-7824

Малахов Андрей Сергеевич

Магистр, МГТУ им. Н. Э. Баумана, 105005, Москва,
Лefortovskaya nab., 1, malakhov_andrey_s@mail.ru,
ORCID: 0009-0002-3155-704X

Malakhov Andrey S.

Master, Bauman Moscow State Technical University, 1
Lefortovskaya nab., Moscow, 105005, Russia,
ORCID: 0009-0002-3155-704X



Статья доступна по лицензии
Creative Commons «Attribution-NonCommercial»



**Образовательный центр
«Энергоэффективные инженерные системы»
Университета ИТМО**

Приглашает принять участие в
XII Международной научно-технической конференции
«Искусственный холод в XXI веке»
посвященной 95-летию основания Ленинградского института холодильной промышленности
19-21 ноября 2025 г.
VIII Международной научно-технической конференции
«Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ»
посвященной 95-летию со дня рождения проф. Платунова Е.С.
27-28 ноября 2025 г.

Основные научные направления конференций:

- «Искусственный холод в XXI веке»
 - промышленный холод и энергоэффективные низкотемпературные системы;
 - криогенная техника, водородные технологии и технологии СПГ;
 - системы кондиционирования и жизнеобеспечения;
 - пищевые системы и консервирование холодом;
- экономическая и экологическая эффективность предприятий.
- «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ»
 - состояние теплофизических измерений в области низких и умеренных температур (методы и приборы);
 - результаты исследований теплофизических свойств;
 - вопросы автоматизации теплофизических измерений;
 - состояние метрологии теплофизических измерений.

Формат проведения конференции – очно-дистанционный.

Регистрация участников – до 1 октября 2025 г.

По итогам конференции будет издан Сборник тезисов конференции, индексируемый в РИНЦ.

Информация о конференциях и регистрация на сайтах:

«Искусственный холод в XXI веке»: <https://rft21.itmo.ru>

«Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ»:
<https://iarspb.tilda.ws/modernmethodsandmeansofresearchofthermophysicalpropertiesofsubstances>