

УДК 669.04

**ТЕНДЕНЦИЯ РАЗВИТИЯ РЕГЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ
DEVELOPMENT TRENDS OF REGENERATIVE HEAT EXCHANGERS**

А.В. Шунькевич, А.С. Парфёнова, Л.В. Маркевич
Научный руководитель – Ю.П. Ярмольчик, к.т.н., доцент
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
yarmolchik@bntu.by

A. Shunkevich, A. Parfenova, L. Markevich
Supervisor – Yu. Yarmolchik, Candidate of Technical Sciences, Docent
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

Аннотация: в статье рассматривается тенденция развития регенеративных теплообменников, их направления и новые технологии.

Abstract: the article discusses the development trend of regenerative heat exchangers, their directions and new technologies.

Ключевые слова: регенеративный теплообменник, термостойкость, покрытия, насадка, цифровизация.

Keywords: regenerative heat exchanger, heat resistance, coatings, nozzle, digitalization.

Введение

В последнее время мы можем наблюдать интерес к регенеративным теплообменникам как ключевым элементам в системах теплообмена и энергосбережения. Эти устройства, способные эффективно утилизировать и повторно использовать тепловую энергию, становятся всё более актуальны в условиях глобального потепления и стремления усовершенствования систем. Важным аспектом при внедрении современных технологий является: снижение выбросов и влияния на окружающую среду. Для регенеративных теплообменников это является одним из ключевых свойств, что позволяет их использовать в различных отраслях- от энергетики до промышленного производства.

Тенденции в развитии регенеративных теплообменников охватывают такие факторы как: инновационные материалы, конструкции, интеграции с возобновляемыми источниками энергии и другие. В данной работе мы рассмотрим ключевые направления и их влияние на эффективность промышленных процессов, а также затронем экологическую составляющую.

Основная часть

Регенеративный теплообменник – это устройство, которое используют в системах охлаждения с целью экономии энергии и повышению эффективности. Тепло, отводимое от хладагента при конденсации, для предварительного нагрева воздуха. Это приводит к снижению на компрессор и увеличению коэффициента производительности. Стабилизация температурных режимов способствует увеличению срока службы оборудования.

Будущее технологии теплообменников формируется несколькими инновационными тенденциями, направленными на повышение эффективности,

устойчивости и адаптивности. Эти инновации обусловлены необходимостью соответствовать строгим нормативным стандартам, снижать воздействие на окружающую среду и удовлетворять разнообразные потребности отраслей. Вот некоторые из ключевых достижений, лидирующих в этом направлении:

1. Улучшенные материалы и покрытия.

Современные материалы и покрытия совершили революцию в технологии теплопередачи. Благодаря их способности выдерживать экстремальные условия и противостоять коррозии, теплообменники служат дольше и работают эффективнее. В частности, углеродные композиты и передовые сплавы, обеспечивающие высокую теплопроводность и устойчивость к разрушению, находят все более широкое применение. В таблице 1 приведены основные материалы с высокой термостойкостью и окислительной стабильностью и их влияние на коэффициент теплопередачи. Данные материалы находят свою эффективность в диапазоне температур эксплуатации от 750 °С до 1300 °С.

Таблица 1 – Материалы с высокой термостойкостью и окислительной стабильностью

Материал	Формула, обозначение	Объекты применения	Оценочная доля увеличения коэффициента теплопередачи
Жаропрочные металлические сплавы	Ni-Cr, Inconel, Hastelloy	Роторные элементы, структура корпуса	3-7 %
Керамические материалы	SiC, Al ₂ O ₃ , Mullite	Структура корпуса	2-5 %
Керамикометаллические композиты	Ni-SiC, Al ₂ O ₃ с армирующими волокнами	Структурные элементы с повышенной прочностью	8-10 %
Сталь с термостойкими покрытиями	Нержавеющая сталь с оксидными покрытиями	Менее критичные зоны, где важна стойкость к коррозии	6-9 %

В таблице 2 приведены покрытия и их влияние на коэффициент теплопередачи.

Таблица 2 – Покрытия и их влияние на коэффициент теплопередачи

Тип покрытия	Материал	Положительный эффект при использовании	Оценочная доля увеличения коэффициента теплопередачи
Нанопористые оксидные слои	Anodized Al ₂ O ₃ , ZrO ₂	Увеличение площади контакта, капиллярный эффект	10-25 %
Гидрофобные покрытия	PTFE, фторполимеры	Улучшение конденсации, капельное испарение	15-40 %
Фазосменные покрытия	VO ₂ , парафиновые микрокапсулы	Сохранение стабильности коэффициента теплопередачи при незначительной смене температуры теплоносителя	20 %
Металлические наноплёнки	Cu, Ag	Менее критичные зоны, где важна стойкость к коррозии	5-15%

2. Компактные и модульные конструкции.

Благодаря своей компактности и адаптивности, модульные теплообменники предлагают значительные преимущества. Их легко модифицировать и обслуживать, а возможность расширения или перенастройки под текущие задачи делает их оптимальным решением для предприятий с постоянно меняющимися производственными процессами.

Рассмотрим первый тип модулей. Сбросные кассетные блоки, нашли своё применение в роторных регенеративных теплообменниках. Принцип действия их заключается в системе модулей, металлические листы с перфорацией, вставляемых в общий барабан, которые дают возможность их замены и регулирования теплового потока без полного разбора системы.

Второй тип модулей. Модули на основе микроканальных пластин, которые могут изготавливаться из алюминия, нержавеющей стали или титана. Размером данные пластины (шириной) от 100 до 500 мкм. Принцип действия заключается в соединении пластин между собой и направлением по одному контуру горячего теплоносителя, а по второму холодного теплоносителя.

К достоинствам модульных конструкций относится их масштабируемость, входе чего можно легко менять количество модулей в соответствии с требуемой мощностью; обслуживаемость, лёгкая замена модулей без надобности полного разбора системы; снижение производственных затрат, которое показало, что при массовом производстве унифицированных модулей происходит снижение общей себестоимости обслуживания регенеративного теплообменника.

3. Цифровая интеграция и интеллектуальные технологии.

Внедрение цифровых технологий в теплообменные системы кардинально меняет подход к их контролю и управлению. Благодаря интеллектуальным датчикам и устройствам Интернета вещей (IoT) можно в режиме реального времени отслеживать ключевые показатели работы, что позволяет своевременно проводить техническое обслуживание. Это приводит к повышению эффективности работы и более точному управлению процессами теплопередачи.

К основным направлениям цифронизации можно отнести сенсоризация и мониторинг в реальном времени. В данном случае происходит внедрение датчиков давления и температуры в теплообменные элементы. Например Siemens применяет в РТ волоконно-оптические сенсоры для оценки температуры в режиме реального времени.

Интеллектуальное управление и адаптация. В эпоху развития ИИ и машинного обучения, которые способны анализировать текущие режимы работы и производить автоматическое регулирование скорости вращения ротора, распределение материальных потоков теплоносителя, тепловые нагрузки. Данные технологии уже нашли своё применение в газотурбинных установках, где за 15-20 секунд до начала критического режима подают сигнал на предотвращение данного перегрева. В силу своих аккумулирующих способностей процесса теплообмена данная тенденция использования ИИ явно благоприятно скажется на эксплуатационных характеристиках

теплообменников и на подборе оптимальных режимов работы и их регулирования в реальном времени.

4. Энергоэффективность и устойчивость.

В условиях стремления к снижению выбросов углекислого газа, энергоэффективные теплообменники становятся все более востребованными в различных отраслях. Регенеративные теплообменники, позволяющие утилизировать и повторно использовать тепло, являются оптимальным решением для экологически устойчивого производства. Их применение не только снижает энергопотребление, но и обеспечивает значительную экономию средств, а также способствует защите окружающей среды.

Рассмотрим следующие способы применения энергоэффективности.

Улучшение теплопередачи. Интенсификация теплообмена – применение передовых конструкций теплообменных поверхностей (например, ячеистых, пористых или микроканальных) для увеличения площади контакта и эффективности теплопередачи.

Турбулизация потока. Использование нанопокровтий и специальных элементов для создания турбулентного потока, что улучшает теплообмен без значительного увеличения сопротивления потоку.

Оптимизация времени контакта. Настройка времени взаимодействия потоков с регенератором, особенно в роторных системах, для максимальной передачи тепла. Эффект – значительное повышение эффективности рекуперации тепла (на 15-40%) при сохранении компактных размеров устройства.

Заключение

Таким образом, тенденции развития регенеративных теплообменников направлены на повышение эффективности, устойчивости и адаптивности технологий к меняющимся условиям рынка и требованиям экологии. Эти изменения открывают новые возможности для оптимизации процессов теплообмена и сокращения затрат на энергоресурсы, что делает регенеративные теплообменники ключевым элементом в переходе к более устойчивым технологиям.

Литература

1. Хладоносители: основные свойства и виды. – URL: <https://hothim.ru/articles/hladonositeli-osnovnye-svoystva-i-vidy> (дата обращения: 24.04.2025).
2. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи): Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., испр. – СПб.: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.