

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКИ.

Системы, способы, устройства

Кандидат технических наук **В.А. ГРУШНИКОВ**
(ВИНИТИ РАН)

Ни одна промышленная, коммерческая и бытовая установка не обходится без реализации термодинамических процессов производства, использования, утилизации, аккумулирования, передачи, транспортирования, трансформации тепловой энергии. Эти процессы осуществляются разными системами, способами и устройствами. Рассмотрим некоторые, заслуживающие внимания из использованных инновационных решений.

Инновационные способы высоко- и низкотемпературной теплогенерации

В широком спектре термодинамических устройств – большой набор нагревателей и охладителей, реализующих тепловые процессы на основе энергоэффективных технологий. В частности, заслуживает внимания реализация тенденции улучшения тепловых характеристик солнечных энергетических установок. Так, например, на кафедре машиностроения Технологического университета им. Амиркабира

Тегерана проведены¹ численное исследование и параметрическая оптимизация турбулентного конвективного теплообмена в канале солнечного воздухонагревателя с новыми ступенчатыми кубовидными перегородками, размещёнными на пластине поглотителя. Проанализированы характеристики теплопередачи и потери давления и процедура оптимизации, основанная на

¹ Parsa H., Saffar-Avval M., Hajmohammadi M.R. 3D simulation and parametric optimization of a solar air heater with a novel staggered cuboid baffles // *International Journal of Mechanical Sciences*. 2021. Vol. 205. P. 106–112.

методе экспериментального проектирования Тагучи для получения оптимальной геометрии и расположения перегородки.

Результаты численного моделирования показали, что предложенная оптимальная конструкция работает лучше, чем существующие. Также установлено, что относительная высота и относительный шаг перегородки являются наиболее влиятельными параметрами на общий и теплогидравлический КПД, для оптимального солнечного воздухонагревателя с перегородками, составляющий 3.43, 2.80 и 2.38 при числах Рейнольдса 5080, 7620 и 10 160 соответственно. В зависимости от числа Рейнольдса теплогидравлический КПД с перегородкой на 17.5% выше по сравнению с характеристиками лучшей традиционной конструкции.

Характеристики теплопередачи важны как при нагревании, так и в процессе охлаждения, что наглядно проявляется при колебательном тепловом потоке в двигателе Стирлинга. Известно, что улучшение теплопередачи охладителя способствует снижению температуры холодного конца и "мёртвого" объёма двигателя Стирлинга. Но в развитии углублённого изучения этого процесса китайскими специалистами в области прикладной термодинамики численно исследован² эффект от присоединения винтовой проволоки к охлаждающей трубе возвратно-поступательного потока в двигателе

Стирлинга (рис. 1). Исследованы характеристики спиральной проволоки с различными геометрическими параметрами и в разных условиях эксплуатации.

Результаты виртуальных и лабораторных экспериментов показали, что линии тока оказались спиралевидными, а температура жидкости оптимизирована. При одном и том же размере перепад температуры усиленной трубки был в 1.08–1.54 раза больше, чем у гладкой трубки. При одинаковой температуре на выходе диаметр гладкой трубки составлял 52% от диаметра усиленной трубки с той же длиной трубы 12.5 мм, высотой 1.2 мм и диаметром 1.6 мм, максимальным линейным и вращательным числом $Re_{max} = 13\,816$, $Re_{\omega} = 207$ соответственно. Установлено, что трубка со спиральной проволокой может значительно улучшить теплопередачу или уменьшить размер охладителя. По сравнению с гладкой трубкой дополнительный перепад давления в усиленной трубке составил не более 0.6% от минимального давления в двигателе Стирлинга.

Несомненный интерес представляет оптимизация схемы теплового потока для усовершенствования термоэлектрической системы охлаждения на основе модифицированного метода тепловых потоков. Интеграционный анализ, моделирование и улучшение нескольких компонентов термоэлектрического охлаждения имеют большое значение для продвижения этой технологии. На основе метода теплового потока в тематическом исследовании со-трудниками Ключевой лаборатории преобразования и систем передачи

² Xin F., Yu M., Liu W., Liu Z. Heat transfer characteristics of enhanced cooling tube with a helical wire under oscillatory flow in Stirling engine// *International Journal of Thermal Sciences*. 2021. Vol. 168. P. 107–113.

Рис. 1. Конструктивная реализация тепловой концепции двигателя Стирлинга



энергии электростанций и Колледжа энергетики и машиностроения Северо-Китайского электроэнергетического университета Пекина экспериментально изучен³ инновационный модифицированный термоэлектрический охлаждающий компонент и построена имитационная математическая модель его эквивалентной схемы путём интеграции связанных процессов термоэлектрической проводимости и преобразования с процессами конвективной теплопередачи как на горячей, так и на холодной стороне.

Модель эквивалентной схемы использована для построения системных моделей передачи и преобразования энергии термоэлектрических холодильных систем (рис. 2) с параллельным, противоточным и поперечным потоками. Исходя из этого, соответствующий процесс расчёта обеспечивается совме-

нием с алгоритмом Гаусса–Зейделя на базе программного обеспечения MATLAB. Результаты моделирования показали, что холодопроизводительность и КПД при противоточной схеме максимальны, а средняя конечная разность температур минимальна при равномерном рабочем токе. Кроме того, разумное неравномерное распределение рабочего тока может эффективно улучшить холодопроизводительность термоэлектрической холодильной системы на 6.6, 32.3 и 1.7% соответственно.

Результаты экспериментов подтвердили, что предложенная модель теплового потока термоэлектрического охлаждающего устройства подходит и осуществима для моделирования и улучшения характеристик за счёт компоновки противотока и неравномерного распределения рабочего потока.

Особого внимания заслуживают инновационные реализации системы охлаждения с использованием в качестве рабочего тела теплоносителя материалов с фазовым переходом, применяемых в устройствах самого

³ Hao J., Chen Z., Ge Z., Sun J., Du X., Chen Q. *Optimal flow layout and current allocation for improving the thermoelectric refrigeration system based on heat current method // International Journal of Energy Research. 2022. Vol. 46. № 3. P. 2826–2839.*

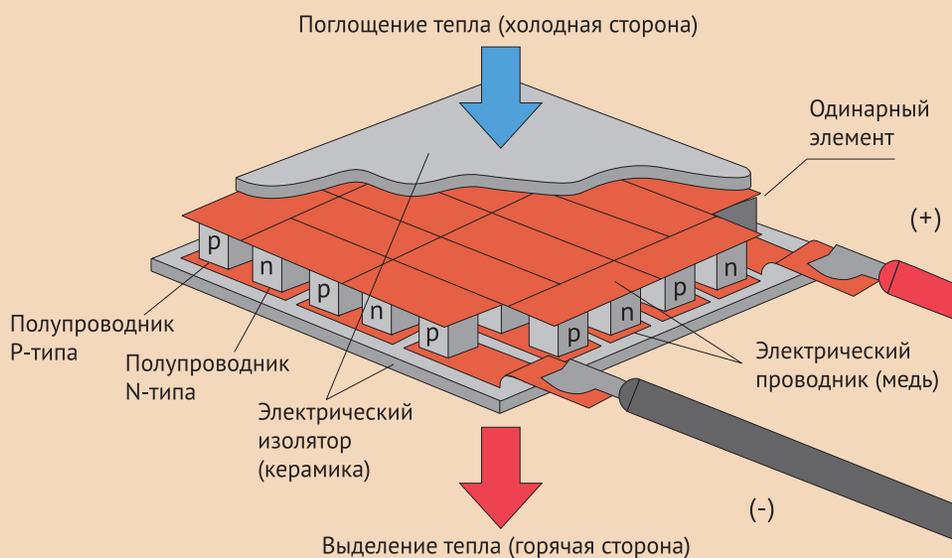


Рис. 2. Концепция термоэлектрической холодильной установки

разного назначения и мощности, начиная от производственных энергетических систем и заканчивая компактными электронными устройствами. Повышение производительности коммуникационной инфраструктуры с функциями обработки и передачи больших массивов информации с применением счётно-решающего электронного устройства технологично и эффективно. Например, достигается использованием патентуемой усовершенствованной системы охлаждения с реализацией эффекта фазового перехода материала-теплоносителя⁴. Эта система охлаждения разделена на соединённые таким образом друг с другом блоки приёма и рассеивания тепла, что-

бы образовать петлю с использованием трубопровода для пара и для жидкости. Хладагент герметизирован внутри системы охлаждения, а в теплоприёмнике передача тепла осуществляется с использованием явления фазового перехода пар-жидкость, при котором в теплоприёмнике жидкий теплоноситель испаряется за счёт получения тепла от тепловыделяющих объектов, а в теплоприёмнике блока рассеивания тепла пары охлаждающей жидкости конденсируются, отдавая тепло потоку охлаждающего воздуха.

Охлаждение выполняется с использованием свойства, при котором температура жидкости поддерживается на уровне точки кипения, в то время как охлаждающая жидкость продолжает испаряться. В блоке приёма тепла используется кожух, расположенный непосред-

⁴ Phase change cooling system and electronic device. Hachiya M., Chiba M.). NEC Corp. Patent US. 11262136. IPC F28D15/02 (2006.01), H01L 23/427 (2006.01), Filed 18.04.2019; Appl. 01.03.2022.

венно над объектами, выделяющими тепло. Кроме того, в теплорассеивающем блоке используется радиатор, расположенный в месте, удалённом от объектов, выделяющих тепло. Несмотря на то, что нагревательные объекты установлены с высокой плотностью и расположены в узком пространстве внутри электронного устройства, теплорассеивающий блок может быть расположен в относительно широком пространстве внутри электронного устройства, и, таким образом, обеспечение зоны рассеивания тепла становится облегчённее по сравнению с воздушным охлаждением. Кроме того, используется скрытая теплота во время фазового перехода хладагента пар–жидкость, и поэтому способность к переносу тепла является высокой по сравнению с водяным охлаждением, что позволяет снизить потребление электроэнергии для охлаждающего вентилятора.

В случае системы охлаждения с фазовым переходом термосифонного типа естественная циркуляция хладагента осуществляется за счёт разности плотностей пара и жидкости и силы тяжести, сопровождаясь уменьшением потребления электроэнергии от внешнего источника. Существующие недостатки такого принципа охлаждения, связанные с большим количеством рассеиваемой тепловой энергии, технологично устраняются использованием свойства поддержания температуры жидкофазного хладагента на уровне точки кипения, при которой охлаж-

дающая жидкость продолжает испаряться.

При этом температура кипения хладагента имеет положительную корреляцию с внутренним давлением теплопринимающего устройства и представлена кривой линии давления паров хладагента, описываемой формулой $T_v = T_a + R_{va} \cdot Q$, где T_v – температура кипения охлаждающей жидкости, T_a – температуры охлаждающего воздуха в °C, R_{va} в °C/Вт – тепловое сопротивление теплоотводящей части, Q в Вт – количество тепловыделения системы охлаждения.

ИЗ ЭТОЙ ПРОСТОЙ И ОЧЕВИДНОЙ ФОРМУЛЫ ВИДНО, ЧТО ПРОПОРЦИОНАЛЬНО ТЕМПЕРАТУРЕ ВНУТРЕННЕЕ ДАВЛЕНИЕ ТЕПЛО-ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ ЧАСТИ УВЕЛИЧИВАЕТСЯ ИЗ-ЗА ПОТЕРИ ДАВЛЕНИЯ В ТРАКТЕ ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ.

Из этой простой и очевидной формулы видно, что пропорциональное температуре внутреннее давление тепловыделяющей части увеличивается из-за потери давления в тракте потока теплоносителя. За счёт модификации этой формулы путём добавления члена повышения температуры кипения в виде $\Delta T_v(P)$, можно компенсировать эту потерю, реализуя возможности системы охлаждения с фазовым переходом по формуле $T_v = T_a + R_{va} \cdot Q + \Delta T_v(P)$. Из неё следует практическая рекомендация о необходимости изгиба паровой трубы под углом 90° с увеличением, таким образом, на этом участке локального коэффициента потери давления и соединения тонкой паровой трубы с верхней поверхностью окружающей её теплопринимающей рубашки.

Локальная потеря давления ΔP в Па на определённом участке пути потока теплоносителя в этом случае описывается следующей формулой зависимости от скорости потока теплоносителя $v(Q)$ [м/с], плотности теплоносителя ρ [кг/м³] и локального коэффициента потери давления ζ , а именно: $\Delta P = \zeta \times \rho \times vQ^2$. В результате этих преобразований количество выделяемого тепла по отношению к системе охлаждения быстро увеличивается, и пропорционально этому увеличивается скорость потока хладагента, циркулирующего внутри системы охлаждения.

Практическая реализация этой теоретической оптимизации осуществляется инновационной системой охлаждения с фазовым переходом электронного устройства в составе блока приёма тепла; теплоотводящего блока; паровой трубы и жидкостной трубы, которые соединяют между собой блок приёма тепла и блок рассеивания тепла, образуя петлю с хладагентом, инкапсулированным внутри системы охлаждения с фазовым переходом.

Инновационные термодинамические устройства

Реализующие рассмотренные преимущества теплохолодильных способов и систем, инновационные термодинамические устройства также отличаются большим разнообразием. К их числу можно отнести совершенствование пусковых характеристик тепловой трубы контура охлаждения заводской энергетической установки. Так например, сотрудниками Инженерно-механического колледжа Университета китайского

Тяньцзиня для прогнозного моделирования с целью исследовательской предпроектной, проектной и эксплуатационной оценки пусковых характеристик тепловой трубы контура охлаждения заводской промышленной установки, в рамках модифицированного коммерческого программно-вычислительного пакета, предлагается⁵ использовать общие уравнения описания стационарного поведения петлевой тепловой трубы, связывая её рабочую температуру с различными жидкостными и геометрическими параметрами. По результатам расчётных экспериментов установлена возможность увеличения задержки газа на выходе до 16%, сокращения пускового периода на 37.2%, а за счёт оптимизации градиента характеристики испарителя – снижения рабочей температуры в каждой точке петлевой трубы на 2 К.

Несомненно, особого внимания заслуживает и бесконтактный водонагреватель. Он представляет собой запатентованный усовершенствованный бесконтактный безрезервуарный водонагреватель, система и способ эксплуатации которого основаны на реализации технологии энергоэффективного нагрева жилых помещений компактными устройствами получения по запросу горячей воды без необходимости её хранения⁶. При открытии крана горячей воды холодная вода поступает в агрегат из водопровода.

⁵ Wang X., Hu Q. Start-up characteristic simulation of a flat-plat loop heat pipe// Tianjin daxue xuebao. 2021. Vol. 54. № 6. P. 645–650.

⁶ Tankless water heater apparatus, system, and methods. Mahajan G., Turner E., Haslbauer F, Prince S.J. Patent US10895405. IPC F28D15/02 (2006.01). Filed 19.01.2021; Appl. 25.09.2018.

Датчик определяет поток воды и активирует нагревательное устройство. Газовый водонагреватель без резервуара использует газовую горелку в качестве источника тепла и теплообменный узел, который эффективно передаёт тепловую энергию от источника топлива небольшому объёму воды, протекающему через водонагреватель. При отсутствии потребности в горячей воде горелка отключается. Бесконтактные водонагреватели значительно снижают потери в режиме ожидания. Устранение риска коррозии из-за накопления осаждающейся накипи достигается регулированием и/или блокированием потока воды через теплообменник и рециркуляционной прокачкой и продувкой сжатым воздухом.

Энергоэффективной является и запатентованная компактная система жидкостно-

го отопления с большим объёмным тепловым потоком с использованием повышенного перепада давления в теплообменнике, отличающаяся улучшенной функциональностью с технологичным применением производственной жидкости для различных коммерческих, промышленных и бытовых применений, таких, например, как гидравлические и паровые котлы с теплоносителем. Инновационная система нагрева жидкого теплоносителя включает⁷ в свой состав сосуд высокого давления, пластинчато-трубный тепло-

обменник внутри него, трубопровод, соединяющий теплообменник с выпуском сосуда высокого давления и нагнетатель подвода газа под давлением. Теплообменник с теплоносителем дополнительно включает проточный канал между входом и выходом сосуда высокого давления. Такая инновационная система нагрева жидкого теплоносителя удовлетворяет условию, что объёмный тепловой поток между концами трубопровода составляет 45 кВт/м² и 300 кВт/м² в разных его зонах, с эксплуатационным давлением 3 и 30 кПа соответственно.

В ряду этих инновационных энергетических установок особого внимания заслуживает и запатентованная

В РЯДУ ЭТИХ ИННОВАЦИОННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ОСОБОГО ВНИМАНИЯ ЗАСЛУЖИВАЕТ И ЗАПАТЕНТОВАННАЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ, ТЕХНОЛОГИЧНО ИНТЕГРИРУЕМАЯ В СОЛНЕЧНУЮ ВОДОНАГРЕВАТЕЛЬНУЮ СИСТЕМУ КОГЕНЕРАЦИОННАЯ УСТАНОВКА

усовершенствованная, технологично интегрируемая в солнечную водонагревательную систему когенерационная установка (рис. 3), способная одновременно вырабатывать как тепловую, так и электрическую энергию, обеспечивать горячую воду и электричество, удовлетворять потребности объекта и использовать теплогенерирующие преимущества той же поверхности солнечного излучения⁸. В настоящее время маломасштабное водяное отопление является рентабельной альтернативой сокращению потребления

⁷ *Compact fluid heating system with high bulk heat flux using elevated heat exchanger pressure drop.* Frechette A. T., Nett C. N., Tighe T. W., Waltz K. R. Patent US10962257. Filed 15.06.2018; Appl. 30.03.2021.

⁸ *Cogeneration system for integration into solar water heating systems.* Leal C. D. A., Beltran C. R. Patent US10883390. Filed 04.12.2018; Appl. 05.01.2021.

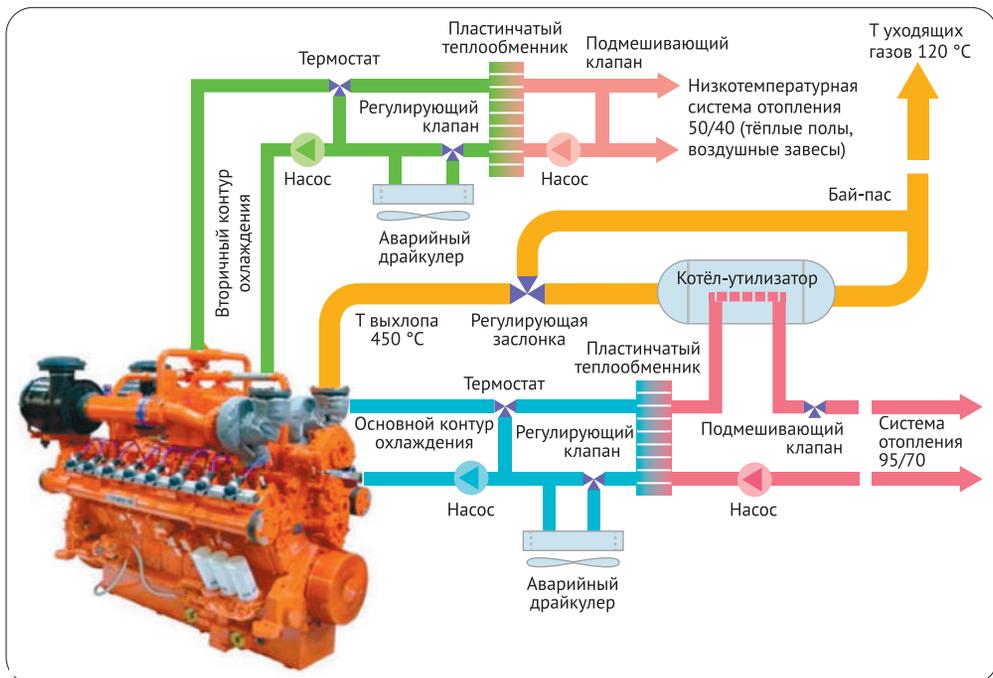


Рис. 3. Реальная когенеративная теплогенерирующая установка, а ещё и плюс солнечная энергия в качестве возобновляемого источника

ископаемого топлива; однако, солнечные ресурсы, доступные летом, не используются из-за низкого спроса на горячую воду для бытовых нужд в течение этого сезона.

Расширение использования энергии, улавливаемой солнечными коллекторами, за счёт интеграции системы когенерации способствует развитию технологической альтернативы для производства электроэнергии за счёт возобновляемых источников энергии, уменьшая зависимость от ископаемого топлива и потребность в электроэнергии из сети. Рекуперация тепла при низких температурах представляет собой один из наиболее важных способов повышения эффективности этих энергетических систем, сокращения использования ископаемого

топлива и повышения энергетической устойчивости, в особенности при технологичной реализации органического термодинамического цикла Ренкина.

Заключение

Рассмотренные примеры исследований, разработок и практических реализаций в виде реальных нагревательных и охлаждающих устройств, систем и способов генерирования положительной и отрицательной тепловой энергии наглядно свидетельствуют о далеко не иссякшем потенциале повышения их энергоэффективности, в особенности востребованном в современных условиях, необходимости бережного отношения к окружающей среде.