ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА, 2025, № 10, с. 62–80

МЕТАЛЛЫ И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ

АНАЛИЗ И ВЫБОР МАТЕРИАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ТЕРМОМАСЛЯНОЙ ORC-УСТАНОВКИ (ОБЗОР)[1]

© 2025 г. Ю. А. Геллер[a], *, И. С. Антаненкова[a], М. М. Виноградов[a], Е. А. Горбунова[a]

[a]Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

**e-mail: GellerYA@mpei.ru*

Поступила в редакцию 11.04.2025 г.
После доработки 20.04.2025 г.
Принята к публикации 24.04.2025 г.

Представлен обзор вариантов материального исполнения основных теплообменных аппаратов: парогенератора, конденсатора, регенеративного теплообменника – при их оптимальном, по мнению авторов настоящей статьи, использовании в конструкции термомасляной ORC-установки. Для парогенератора, нагреваемого термомаслом, как и для водоохлаждаемого конденсатора, рассматривался аппарат кожухотрубного типа. В качестве альтернативы последнему был также исследован пластинчатый полусварной аппарат. Для воздухоохлаждаемого конденсатора изучены варианты материального исполнения аппаратов с ребристо-трубной и микроканальной теплообменной поверхностью, а для регенеративного теплообменника – с пластинчато-ребристой поверхностью. Обоснован выбор наиболее рациональных теплопередающих, теплоизоляционных и конструкционных материалов с учетом особенностей используемых рабочих сред. Проанализированы действующие нормативные документы, определяющие материальное исполнение теплообменников с подходящими режимными условиями процесса, а также предпринята попытка систематизировать информацию, опираясь на опыт изготовителей. Установлено, что в изданных каталогах промышленного оборудования недостаточно данных о применяемых материалах, технологиях соединений теплопередающих элементов (трубок с трубной решеткой, пластин, элементов теплообменников) и рабочих средах. При этом предложения по выбору материального исполнения ограничены одним-двумя решениями. В нормативной документации, напротив, представлены более разнообразные варианты материалов. В научно-технической литературе рассматриваются еще не эксплуатируемые и не внесенные в стандарты материалы, однако они формируют перспективные направления развития данной области. Выполненный анализ всех перечисленных источников информации позволил составить рекомендации по оптимальным материальным исполнениям каждого из рассмотренных аппаратов, обеспечивающим соответствие режимным и температурным условиям работы установки.

Ключевые слова: органический цикл Ренкина, ORC-установка, термомасло, фреон, материальное исполнение, кожухотрубный теплообменник, пластинчатый теплообменник, микроканальный теплообменник

DOI: 10.56304/S0040363625600338

В результате выполненных обзора и анализа оптимальных конструктивных решений для основных теплообменных аппаратов термомасляной ORC-установки [1] была выявлена необходимость более глубокого рассмотрения проблемы их материального исполнения. Правильный выбор материала обусловлен такими факторами, как эффективность теплообмена, размеры, стоимость и долговечность теплообменника. Для удобства и точности проектирования и конструирования нужно не только знать точную марку материала, но и обосновать свой выбор на случай его (материала) возможной замены. Среди главных критериев, определяющих выбор аппаратов ORC-установки, выделяют коррозионную стойкость в условиях высоких/низких температур и агрессивных сред, теплопроводность, пластичность и прочность при воздействии высоких температур и механических нагрузок, стоимость, технологические свойства (возможность сваривания и/или вальцевания), продолжительность эксплуатации, плотность (удельный вес), коэффициент шероховатости.

[1] Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 23-79-10074). https://rscf.ru/project/23-79-10074/

Материалы теплообменников подбирают в соответствии с функциональным режимом рассматриваемого аппарата. Среди конструкций, рекомендованных в [1], представлены кожухотрубные аппараты для парогенератора типа “масло – фреон” и конденсатора типа “фреон – вода”. Также для водоохлаждаемых конденсаторов рассматривались полусварные аппараты пластинчатого типа, а для воздухоохлаждаемых – с ребристо-трубной и микроканальной поверхностью теплообмена. Для регенеративного аппарата типа “фреон – фреон” в качестве наиболее оптимальной конструкции рекомендован пластинчато-ребристый теплообменник. Таким образом, назначение, конструктивное исполнение и рабочие параметры аппаратов термомасляного ORC-контура существенно различаются, что влечет за собой необходимость многофакторного анализа аппаратов и используемых для их изготовления материалов.

В ходе изучения информации о рекомендованных конструкциях теплообменников было показано, что не для всех из них есть нормативная документация с указанием материального исполнения, а имеющиеся данные не всегда соответствуют режимным параметрам термомасляной ORC-установки. Рассматривать конструкции по технической документации производителя затруднительно, так как изготовители ограничивают представленный перечень материального исполнения аппаратов. Новые материалы, предложенные в научной литературе для повышения эффективности работы теплообменников, как правило, немногочисленны. Кроме того, зачастую аппараты на их основе находятся на стадии разработки.

Цель настоящей статьи – обзор возможных материалов для изготовления основных элементов конструкции теплообменных аппаратов термомасляной ORC-установки и составление рекомендаций по их выбору исходя из требований нормативной документации, имеющейся информации от производителей промышленного оборудования и перспективных научных разработок.

КОЖУХОТРУБНЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ: ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

К основным критериям выбора материалов для узлов кожухотрубных аппаратов относятся коррозионно-агрессивные свойства жидкостей, температурный режим, давление в трубках и межтрубном пространстве, теплопроводность λ материалов, технология соединений трубок и трубных решеток.

Аппараты этого типа были рекомендованы для двух принципиально разных по назначению, температурному режиму и используемым теплоносителям элементов ORC-установки: фреоновых парогенераторов (по сути, маслоохладителей) и водоохлаждаемых конденсаторов.

Однако целесообразно рассмотреть некоторые их элементы в рамках общего подхода во избежание повторений. В частности, общая информация по выбору материалов, применяемых при изготовлении трубок и трубных решеток, представлена в табл. 1. Такой выбор обусловлен сочетаемостью материалов при вальцовке и/или сварке. Согласно [19], механические свойства материалов теплообменных трубок и трубных решеток должны удовлетворять следующим условиям:

$$\sigma_т^p \geq \sigma_т^т; \quad (1)$$

$$\delta_5 > 20\%, \quad (2)$$

где $\sigma_т^т$, $\sigma_т^p$ – наименьший предел текучести материалов трубок и трубных решеток соответственно, МПа; δ_5 – относительное удлинение пятикратного образца после его разрыва[2], %.

Для возможности проверки выполнения условий (1), (2) в табл. 1 приведены значения пределов текучести трубок и решетки и относительное удлинение материала трубок.

Требования по шероховатости прописаны в ГОСТ Р 55601-2013 [20], из которого следует, что параметр шероховатости Δ_z, мкм (высота неровностей профиля по десяти точкам), применяется для поверхностей трубных отверстий и зачищенных концов труб в зависимости от вида соединений.

КОЖУХОТРУБНЫЕ ФРЕОНОВЫЕ ПАРОГЕНЕРАТОРЫ (МАСЛООХЛАДИТЕЛИ)

Как уже отмечалось ранее, в рассматриваемой схеме ORC-установки фреон нагревается вязкой средой – термомаслом. В аппаратах рекомендованной конструкции [1] кипение фреона происходит внутри трубок, а охлаждение масла – в межтрубном пространстве.

Так как в нормативной документации нет информации о теплообменниках с системой “фреон – масло” и не существует оборудования, при использовании которого можно было бы провести соответствующее практическое исследование, то для оптимального выбора материалов можно проанализировать их прототипы – испарители с фреоном в трубках и маслоохладители с системой “масло–вода”.

Трубки и трубные решетки для маслоохладителей

Основной критерий при выборе материала для теплообменных трубок – химический состав охлаждающей жидкости, в частности коррозионно-агрессивные свойства ее компонентов. Со сто-

[2] Нижний индекс 5 означает кратность образца – отношение его расчетной длины к исходному диаметру.

Таблица 1. Материалы, применяемые для изготовления трубок и трубных решеток в кожухотрубных теплообменных аппаратах

Вид теплообменника[1]	Материал трубки	$\sigma_т^т$, МПа	δ_5, %	λ, Вт/(м · К)	Материал трубной решетки	$\sigma_т^р$, МПа × 10^{-5}	Исполнение по нормативной документации	Пример промышленного применения
И, К	Сталь 10 [2]	206 [2]	26 [2]	58 при 100°С [3]	16ГС [4]	295[2] [3]	М1 [5, 6]	–
И, К	Сталь 20 [2]	245 [2]	23 [2]	51 при 100°С [3]	16ГС по [4]	295[2] [3]	М1 [5, 6]	–
К	Латунь ЛАМш 77-2-0.05 [7]	145 [8]	50 [8]	103 при 100°С [8]	16ГС с наплавкой ЛО62-1 или Л63	295[2] [3]	М3 [5, 6]	–
К	08Х18Н10Т	≥216 [9]	37 [9]	–	08Х18Х10Т	275 [3]	М13, Б2, М10 [5, 6]	Серия АНФ [10]
К	12Х18Н10Т	≥216 [9]	35 [9]	16 при 100°С [3]	12Х18Н10Т	225–315 [3]	М13, Б2, М10 [5, 6]	Серия АНФ [10]
И	10Х17Н13М2Т	Нет данных[3] [9]	35 [9]	14.7 при 20°С [3]	10Х17Н13М2Т	236 [3]	М9, М11, Б3 [5, 6]	–
К	10Х17Н13М2Т	Нет данных[3] [9]	35 [9]	14.7 при 20°С [3]	10Х17Н13М2Т	236 [3]	М9, М11, Б3 [5, 6]	Серия АНФ [10]
И	08Х18Н10Т	≥216 [9]	37 [9]	16 при 100°С [3]	Двухслойная сталь16ГС + + 12Х18Н10Т	295[2] [3]	Б6 [5]	–
К	Титановый сплав ВТ 1-0	24 (ГОСТ 22897-86)	24 (ГОСТ 22897-86)	18.85 при 100°С	Титановый сплав ВТ 1-0	–	М19, М20 [5, 6]	WHC-DKG [11]
И	Сталь 10Г2	245 (ГОСТ 8733-74)	21	38 (при 200°С) [3]	Сталь 10Г2С1 по [4]	325 [4]	М17 [5, 6]	–
И	Сталь 10Г2	245 (ГОСТ 8733-74)	21	38 (при 200°С) [3]	Сталь 09Г2С по [4]	305 [4]	М17 [5, 6]	–
К (для пресной воды)	Медь (и ее аналоги): С12200, М1р, SB359, Cu-DHP	80–140 (твердое)[4], 35–80 (мягкое)[4] [12]	40	390 при 20°С [8]	Углеродистая сталь: сталь марок 20, 10, P265GH, G-30	≈290–330	–	Серии CFC, CRS, CPLUS, ACFL и CDEW [13], RKDEW [14], CF [15], K CXP, CRF [16], ESK [17]

Таблица 1. Окончание

Вид теплообменника[1]	Материал трубки	$\sigma_т^т$, МПа	δ_5, %	λ, Вт/(м · К)	Материал трубной решетки	$\sigma_т^р$, МПа × 10^{-5}	Исполнение по нормативной документации	Пример промышленного применения
И, К	Cu-DHP (М1ф)	80–140 (твердое), 35–80 (мягкое) [12]	40	387 при 20°С	Сталь 20, 10, P265GH, G-30	≈290–330	–	Dryplus3 [18]
М	Cu-DHP (М1ф)	80–140 (твердое), 35–80 (мягкое) [12]	40	387 при 20°С	Сталь 20, 10, P265GH, G-30	≈290–330	–	OW941 [16][5]
К (для морской воды)	МНЖМц10-1-1[6]	450 (твердое), 140 (мягкое) [8]	5 (твердое), 40 (мягкое) [8]	50 при 100°С [8]	Коррозионностойкая сталь AISI 316	–	–	Серии CFC/M, CFL/M, ACFC/M, ACFL/M, ACFL/M [13]
К (для морской воды)	МНЖМц30-1-1[7]	480 (полутведое)[4], 170 (мягкое) [8]	3–5 (полутвердое), 40–50 (мягкое) [8]	29 при 100°С [8]	Коррозионностойкая сталь AISI 316	–	–	Серии CFC/M, CFL/M, ACFC/M, ACFL/M, ACFL/M [13]
К (для морской воды)	МНЖМц10-1-1	450 (твердое), 140 (мягкое) [8]	5 (твердое), 40 (мягкое)	50 при 100°С [8]	Коррозионностойкая сталь AISI 316L	–	–	McDEW [13], серия RKMDEW [14], CF/M [15], ESK.D [17]

[1]И – испаритель, К – конденсатор, М – маслоохладитель.

[2]Приняли, что трубная решетка толщиной условно 20–30 мм.

[3]Изначально работает как маслоохладитель “масло – вода”, но может работать в системе “масло – фреон”.

[4]Мягкое – отожженное состояние, полутвердое (полунагартованное) и твердое (обжатие более 35%) относится к меди и сплавам.

[5]Определяют по требованию заказчика, при этом предел текучести должен быть согласован между изготовителем и заказчиком.

[6]Может быть указано как Cu/Ni 90/10, мельхиор, медно-никелевый сплав (CuNi10Fe1Mn), UNS C70600.

[7]Может быть указано как Cu/Ni 70/30, мельхиор, медно-никелевый сплав.

роны масла негативных реакций не ожидается, так как при соблюдении температурного режима, рекомендуемого производителем, исключается образование продуктов, ведущих к образованию отложений [21–25]. Температурный диапазон работы таких аппаратов от 50 до 350°С [21]. Важно подобрать термомасло, соответствующее температурному режиму теплообменника, и не превышать максимальных значений рабочих температур.

Ориентируясь на данные [5], можно выбрать материальные исполнения трубок М1, М9, М11, М17, Б3, Б6 (см. табл. 1), соответствующие виду теплообменника “Испарители”. В этих случаях для трубок используются в основном конструкционные качественные углеродистые (сталь марок 10 и 20) и коррозионно-стойкие (08Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т) стали. Согласно данным [26], такие материалы весьма стойкие по отношению к фреонам, но, как отмечается в [27], эта характеристика проявляется только при отсутствии влаги и ограничивается температурой кипения фреона. При протекании внутри трубок фреона попадание влаги в замкнутый контур не предполагается. Соответственно, более точный выбор материала может быть продиктован экономическими и/или технологическими причинами.

В нормативной документации для испарителей не предложены теплообменные трубки из цветных металлов, только стальные, но опыт производителей с учетом внутренних стандартов организаций, технических условий или технического задания позволяет выбрать материалы, отсутствующие в государственном стандарте. Например, трубки водоохлаждаемых маслоохладителей иногда изготавливают из латуни (Калужский турбинный завод [28]). Такой выбор обусловлен влиянием на них (трубки) загрязненной или соленой воды, что для рассматриваемых аппаратов “масло – фреон” не актуально. В [29] отмечается, что все чаще при конструировании маслоохладителей отказываются от использования латунных трубок Л68 и трубных латунных решеток в пользу коррозионно-стойкой стали, что также обусловлено химической активностью среды. При этом, чтобы восполнить потери от снижения теплопроводности трубок (у латуни она в 6–7 раз выше, чем у стали), предлагается интенсифицировать теплообмен с помощью витых стальных трубок.

В качестве альтернативного варианта стальным и латунным трубкам в маслоохладителях и испарителях активно применяются медь и медно-никелевые сплавы. В [30] указано, что медь можно использовать в теплообменниках (испарителях) с фреонами, но вследствие того, что данный металл будет контактировать с фреоном, он должен быть бескислородным или раскисленным. Также в [30] отмечена несовместимость меди и медных сплавов с аммиаком, но данный хладагент (фреон) не входит в перечень рабочих веществ, рекомендованных для ORC-установок [21].

В качестве материала теплообменных трубок изготовители водоохлаждаемых испарителей выбирают медь. В [7] для теплообменников представлены две марки медных трубок – М1р и М2р. Как правило, при производстве трубок используется М1р или аналоги зарубежного производства – С12200 (США), Cu-DLP (ЕС). Так, например, трубки испарителя WTK [15] выполнены по Европейскому стандарту EN12452 из меди С12200 с оребренной внутренней поверхностью.

Несмотря на множество составленных рекомендаций по изготовлению трубок с внутренним оребрением для испарителей и маслоохладителей, в нормативных рекомендациях и сортаментах не представлено типовых размеров канавок и ребер. Фирма HALCOR S.A. выпускает медные трубки с внутренним оребрением Talos IGT (с канавками), которое усиливает передачу тепла хладагентами, если типоразмеры и схема трубки соответствуют представленным в [31].

Еще один материал исполнения трубок испарителя – мельхиор. Как правило, используются две его отечественные марки: МНЖМц10-1-1 и МНЖМц30-1-1 [32]. Однако обычно мельхиор применяется, если одним из охладителей является загрязненная или соленая вода.

Таким образом, можно утверждать, что для теплообменных трубок, по которым движется фреон, при температурном режиме, соответствующем температуре кипения фреона (до 200°С) [21], с учетом коррозионной стойкости по отношению к обоим теплоносителям (фреону и маслу) можно использовать качественную углеродистую и коррозионно-стойкую сталь, а также медь и медные сплавы, в том числе латуни и мельхиор. Но в рамках настоящего исследования в качестве оптимального материала теплообменных трубок принята медь.

Несмотря на то что медь дороже коррозионно-стойкой стали примерно в 10 раз, ее теплопроводность в 5–20 раз выше, а срок службы больше. Кроме того, из меди можно делать внутреннее оребрение, она вальцуется легче других материалов и удовлетворяет условию (2).

Так как медь не указана в табл. 1, составленной в соответствии со стандартными рекомендациями по выбору материала трубок, то при производстве трубной решетки можно использовать любой из материалов, перечисленных в таблице и удовлетворяющих условию (1), например качественную углеродистую сталь (такой выбор основан на опыте других изготовителей).

Корпус и распределительные камеры

Нормативные документы непосредственно для материального исполнения маслоохладителей

“фреон – масло” не предусмотрены или отменены. Поэтому при анализе возможных материалов для изготовления кожуха маслоохладителей можно опереться на опыт производителей.

При конструировании корпуса маслоохладителя производители, например Калужский турбинный завод [28], используют в основном сталь 20. Выпускаются также корпуса из меди М3 (модели МО-9, МО-10/1) и титановых сплавов 3В (модель МО-05) для аппаратов с условным низким и условным высоким давлением соответственно. Распределительные камеры и крышки могут быть изготовлены из серого чугуна (модель МО-14) [28]. Компания Refkar [33] производит маслоохладители серии RYG и RYS с корпусом из углеродистой стали Carbon Steel.

Следует отметить, что материалы, выбранные для создания элементов фреонового парогенератора, в целях унификации оборудования могут быть использованы и в подогревателе фреона.

Таким образом, для кожухотрубного фреонового парогенератора и подогревателя (маслоохладителей) теплообменные трубки могут выпускаться практически из любого материала (углеродистая и коррозионно-стойкая сталь, латунь, медь, мельхиор). Оптимальным материалом является медь, так как она довольно стойкая и имеет самую высокую теплопроводность по сравнению с другими материалами. Опираясь на опыт изготовителей трубной решетки, можно рекомендовать сталь 10 или сталь 20. Кожух аппаратов, как и распределительные камеры и крышки, также возможно производить из стали 20.

КОЖУХОТРУБНЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

В межтрубном пространстве кожухотрубных конденсаторов конденсируется фреон, а по трубкам под напором протекает охлаждающая вода. В целях повышения эффективности работы теплообменного оборудования межтрубный контур можно разделять перегородками, чтобы изменить скорость движения фреона [1].

Вне зависимости от вариации конструкции кожухотрубных конденсаторов для их исполнения могут применяться одинаковые материалы. Основные параметры при выборе материала для данных аппаратов – температурные показатели и химическая активность теплоносителей.

Исторически сложилось, что во фреоновых конденсаторах использовались красномедные (отожженные медные) трубки с накатанным спиральным оребрением со стороны фреона. Применение медных трубок объясняется чистотой поверхности трубок, отсутствием коррозии, простотой накатки ребер, меньшими потерями напора воды. Однако такие трубки существенно удорожают стоимость конденсатора, а при охлаждении аппарата соленой водой усиливается коррозия стальных трубных решеток в месте стыка с медными трубками [34].

Материалы, применяемые для изготовления трубок и трубных решеток конденсаторов, выбранные из нормативной документации России [6, 20, 35], представлены в табл. 1. Анализ полученных данных показывает, что материалы, рекомендованные для теплообменных трубок, совпадают с материалами решетки, кроме углеродистых конструкционных сталей марок 10 и 20 и латуни. Первое исключение обусловлено требованиями материального исполнения М1 [6, 20, 35]: сталь 10 и 20 – бесшовные трубки, 16ГС – толстолистовая сталь. Вторая особенность состоит в том, что трубная доска всегда производится из стали, так как является несущей конструкцией для пучка трубок, но для лучшего соединения с латунными трубками (развальцовка, приварка с развальцовкой) она изготавливается методом плакирования стали латунью Л63 или ЛО62-1 [20]. И в том, и в другом случае обеспечивается выполнение условия (1).

Латунная трубка при взаимодействии с пресной водой имеет хорошие характеристики теплопередачи и коррозионную стойкость как относительно воды, так и относительно фреона. Но, как было показано в [36], происходит коррозия адмиралтейской латуни (30% цинка, 1% олова) при наличии в межтрубном пространстве теплообменника солоноватой воды, что затрудняет обслуживание аппарата и снижает срок его эксплуатации. Поэтому вместо латуни (любой) следует использовать медно-никелевый сплав (70% меди, 30% никеля) [37]. Такой сплав (с процентным соотношением Cu/Ni 90/10 или 70/30) применяется в конденсаторах моделей McDEW производителя Alfa Laval, а именно в теплообменных трубках с внутренним оребрением [6].

Фактически медно-никелевые сплавы, являющиеся мельхиорами, задействованы при изготовлении теплообменных аппаратов, однако в нормативной документации [20] в качестве материала мельхиор не указан. Тем не менее ГОСТ 10092-2006 [32] предполагает выпуск мельхиоровых труб для этой цели. Согласно [32], по химическому составу сплаву Cu/Ni 90/10 соответствует мельхиоровый сплав российской марки МНЖМц10-1-1, а сплаву Cu/Ni 70/30 – марки МНЖМц30-1-1. Современные исследования [38] показывают, что мельхиоровые сплавы Cu/Ni 70/30 должны быть улучшены путем тщательного выбора соответствующих легирующих составов, так как при взаимодействии с соленой (морской) водой в теплообменниках с медно-никелевыми трубками возникали утечки через точечные отверстия, что приводило к локальному истончению трубок примерно через 5 лет эксплуатации оборудования [39].

В качестве других материалов исполнения трубок конденсаторов в нормативной документации предлагается коррозионно-стойкая сталь (см. табл. 1), соответственно трубные решетки выполнены тоже из нее. Стальные теплопередающие трубки требуют развития (“расширения”) поверхности. Компания АНВИТЭК, выпускающая теплообменники, в том числе для холодильной отрасли [10], предлагает использовать для этой цели пучки трубок диаметром 8 мм специального рифления, изготовленных из нержавеющей стали AISI 304, AISI 321, AISI 316 или AISI 316 Ti. В конденсаторах серии АНФ [10] применяется хладагент R407C.

Обычно кожух, крышки и перегородки кожухотрубных конденсаторов выполняются из углеродистых сталей обыкновенного качества (Ст2сп), качественных углеродистых сталей марок 10, 20 и легированной стали 16ГС. Но, к примеру, компания Alfa Laval в некоторых конденсаторах устанавливает перегородки с тефлоновым покрытием: серия CDEW (при работе с хладагентом R407C) или CDEW-E (для R134a) [13]. К нетрадиционным материалам кожуха можно отнести полипропилен или титан [11].

Фирма Alfa Laval, как правило, применяет разные материалы при изготовлении аппаратов, функционирующих на пресной и морской (соленой) воде, поэтому в первом случае предлагается изготавливать крышки из углеродистой стали, а во втором – из нержавеющей стали AISI 316 [13]. В качестве материала для трубного пучка аппаратов с пресной водой может быть выбрана медь. При производстве трубок Alfa Laval использует медь марки C12200.

Аналогичное материальное исполнение для конденсаторов предлагает компания WTK [15] (см. табл. 1): в случае пресной воды как рабочей жидкости применяют медные трубки марки C12200 (российский аналог – М1р) с внутренним оребрением, для морской воды – медно-никелевый сплав C70600 (Cu/Ni 90/10 – российский аналог МНЖМц10-1-1) с пазами на внутренней поверхности и ребрами на наружной поверхности.

Из проведенного анализа материалов для теплообменных трубок и трубных решеток кожухотрубных водофреоновых конденсаторов следует, что в отечественной и зарубежной практике рекомендованы и широко распространены теплообменные трубки из меди и медных сплавов (см. табл. 1). Хорошая теплопроводность, удовлетворительный срок эксплуатации предопределили их использование. Особенность меди заключается в возможности выполнять монометаллическое оребрение, но ее применение ограничивается аппаратами, охлаждаемыми чистой пресной водой. Для этой цели подойдет медь марки М1р. При производстве аппаратов, охлаждаемых соленой или загрязненной водой, можно обратить внимание на медно-никелевые сплавы, аналогичные мельхиорам МНЖМц10-1-1 и МНЖМц30-1-1, а также латунь ЛАМШ 77-2-0.05 и ЛО77.

Водофреоновые конденсаторы с трубками из коррозионно-стойкой стали или титана серийно выпускаются редко, потому что эти материалы “избыточны” по своим свойствам: работают при более высоких и низких температурах и в более агрессивных средах. Но многие изготовители предлагают выполнять из них конденсаторы по желанию заказчика.

Таким образом, для изготовления теплообменных трубок кожухотрубных фреоновых конденсаторов, охлаждаемых чистой пресной водой, может быть рекомендована медь марки М1р, а для трубных решеток, крышек, перегородок и кожуха – углеродистая сталь.

ПЛАСТИНЧАТЫЙ ПОЛУСВАРНОЙ КОНДЕНСАТОР

В качестве фреоновых конденсаторов с водяным охлаждением в [40, 41] рекомендуют использовать цельносварные или полусварные пластинчатые аппараты. В конструкции пластинчатого конденсатора предусмотрен сварной (неразборный) канал, расположенный со стороны конденсирующегося фреона, при использовании воды в качестве теплоносителя применяется разборный канал [1].

В нормативной документации [42] такие конденсаторы изготавливают из коррозионно-стойких сталей или титана.

Компания Danfoss [43] выпускает для полусварных пластинчатых конденсаторов серии SW теплообменники с пластинами из нержавеющей стали AISI 316L и титана. Титановые пластины применяются редко, в частности при высоком содержании хлора в воде. Вся серия SW этого производителя рассчитана на использование аммиака в качестве хладагента.

Компания Alfa Laval в конденсаторах серии REF*[3] предлагает аналогичные материалы исполнения для пластин: титан и AISI 316 для температурного диапазона от –10 до +120°C, но их рекомендуют не только для аммиака, но и для фреона R22.

Фирмы “Ридан”, Funke и др. выпускают пластины из коррозионно-стойкой стали разных марок, титана и сплава Hastelloy C276 (табл. 2). Например, нержавеющая сталь AISI 304 (российский аналог – 08Х18Н10) – наиболее экономичное решение при использовании неагрессивных сред, а сталь AISI 316 (аналог – 03Х17Н13М2) – более стойкая к коррозии, воздействию высоких температур и агрессивной среды. Она также устойчива к воде, пару, гликолям, маслам, бензи-

[3] REF* – исполнение для низких температур.

Таблица 2. Материалы пластин для пластинчатых теплообменников

Материал пластин (его российский аналог)	λ, Вт/(м · K) при 20°C	Производитель	Рабочие среды	Характеристика	$\sigma_в/\sigma_т/\delta_5$*, МПа/МПа/%
03Х17Н13М2 (AISI 316, SS316)	16.3	“Ридан” [41]	–	Устойчив к коррозии в кислотах и хлоридах, в том числе при повышенных температурах	515–690/205–220/40–60
		Danfoss, SW	NH_3		
		Funke [44, 45]	Фреоны		
		Alfa Laval для систем холодоснабжения [46]	R-401, R404a, R134a, R22, NH_3		
AISI 316L, 03Х17Н14М3 (AISI 316L)	–	Funke серии FPG [44, 45]	Фреоны	Устойчив в кислотных растворах умеренных концентраций хлоридов и кислот (серной, фосфорной, органических) и хлорированных химических сред	–
08Х18Н10 (AISI 304, SS304)	16.2	Alfa Laval для систем холодоснабжения [46]	–	Устойчив в кислотных растворах высокой концентрации, в том числе азотной, уксусной, фосфорной кислот, щелочей и солей при невысоких температурах	509/206/40 (по аналогу) [3]
10Х17Н13М2Т, 06ХН28МДТ (SMO 254)	14.0	“Ридан” [41]	–	Не подвержен коррозии в нейтральных и кислых водных растворах, восстановительных и солевых растворах	680/300/50 [3]
ВТ 1-0 (Titan Grade 1, G1)	21.9	“Ридан” [41]	–	Устойчив к концентрированным растворам хлоридов, к агрессивным кислотам (серной и соляной), к средам, содержащим спирт, перегретому пару с высокой температурой	240/138/24 [3]
Hastelloy C 276	9.8	“Ридан” [41], Funke серии FPG [44, 45]	–	Нейтрален к агрессивным кислотам: серной, соляной и плавиковой, а также концентрированным растворам хлоридов и сероводорода	758/ 363/62 [3]

*$\sigma_в$ – временное сопротивление разрыву, $\sigma_т$ – предел текучести.

нам, керосину, слабым кислотам и прочим веществам из-за входящего в ее состав молибдена. Пластины из титана и сплава Hastelloy C276 приспособлены к работе в высокоагрессивной среде.

Выполненный обзор и проведенный анализ показали, что оптимальными материалами для изготовления пластин полусварного конденсатора ORC-установки являются коррозионно-стойкие стали, среди которых можно рекомендовать 03Х17Н13М2. Эта сталь устойчива к воздействию фреона и воды при любой концентрации хлоридов в заданном температурном диапазоне. Кроме того, она наиболее часто используется изготовителями. Аналогичная по свойствам (в предложенных условиях), но более дешевая – сталь 08Х18Н10, однако ее применение возможно только при наличии качественной пресной охлаждающей воды.

ВОЗДУШНЫЕ РЕБРИСТО-ТРУБНЫЕ ФРЕОНОВЫЕ КОНДЕНСАТОРЫ

Воздушные ребристо-трубные фреоновые конденсаторы [1, 47–49] состоят из кожуха в форме прямоугольной рамки, изготовленной из листовой стали, и расположенных в нем горизонтально оребренных трубок, соединенных в плоские змеевики. Параллельные змеевики объединяются в верхней части паровым, а в нижней – жидкостным коллекторами, внутри которых движется фреон.

По нормативной документации [20, 50] теплообменные трубки и трубные решетки в аппаратах воздушного охлаждения (АВО) нужно изготавливать из материалов Б1, Б2, Б3, Б5 и М1А (табл. 3). Трубные решетки рассматриваются только для аппаратов с разъемной камерой.

В АВО могут применяться теплообменные трубки с различным оребрением. В ГОСТ Р 51364-99 [50] рекомендованы четыре способа оребрения:

поперечно-винтовое накатывание ребер на алюминиевой трубке, надетой на гладкую несущую трубу, с образованием биметаллической оребренной трубки;

метод навивки алюминиевой ленты с последующей завальцовкой ее в винтовую канавку на поверхности несущей трубки;

формирование L-образных ребер методом навивки с натягом алюминиевой ленты на несущую трубку;

метод навивки стальной ленты с обваркой.

Во втором и четвертом способах образование ребер возможно только при использовании материала Б1, т.е. трубок из углеродистой стали (сталь марок 10 и 20). Первый и третий способы подходят для всех предложенных АВО.

Первый способ оребрения применяют многие изготовители, в том числе компания Alfa Laval (серия Arctigo) в аппаратах, работающих на различных хладагентах (HFC, аммиак, CO_2, рассол). Компания предложила следующее исполнение: трубка медная с внутренним оребрением или без него (для рассола) или трубка из коррозионностойкой стали с установленными снаружи гофрированными ребрами из алюминия толщиной 0.3 мм. Ребра могут быть предварительно окрашены либо изготовлены из алюминиевого сплава, устойчивого к воздействию морской воды, например сплава 5052.

Применение биметаллических трубок с оребренной рубашкой из алюминиевых сплавов

Таблица 3. Материальное исполнение ребристо-трубных охладителей

Элемент	Материальное исполнение согласно ГОСТ Р 55601-2013					Материальное исполнение действующих аппаратов		
	Б1	Б2	Б3	Б5	М1А [К3]	Alfa Laval Blue BC & BN (для BC)	TFCH Termoflow	TERMA серия UDR/UDW
Внутренняя трубка	Сталь 10, 20, 10Г2	Сталь 15Х5М, Х8	Сталь 12Х18Н10Т, 08Х18Н10Т, 08Х22Н6Т	Латунь ЛАМш 77-2-0.05 по ГОСТ 21646	Алюминиевый сплав АД1 (заготовка)	Медная, с алюминиевыми ребрами [48]	Медная, с алюминиевыми ребрами [51]	Медная, с оребрением из толстого алюминия [51]
Трубная решетка	Сталь 16ГС, 09Г2С, 10Г2С1, 10Г2С1	Сталь 15Х5М	Сталь 12Х18Н10Т, 08Х22Н6Т	Сталь 09Г2С, 10Г2С1, с наплавкой латунью ЛО 62-1 или Л 63	Алюминиевые сплавы АМг 5, АМг 6	–	–	–

АМц (М)[4] (3003) или АД1 (1013) обусловлено необходимостью улучшить теплообмен и массовые характеристики аппарата [52]. В качестве заготовки для оребрения трубок методом накатки рекомендуется использовать трубку из алюминия марки 1013, методом навивки – ленту из Al марки 1013 (М) [50].

Технология изготовления биметаллических трубок существенным образом влияет на термическое сопротивление $R_{КТ}$ в месте контакта двух металлов, которое необходимо учитывать при тепловом расчете аппаратов. Коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$ воздуха в межтрубном пространстве, по данным [52], составляет 20–300 Вт/(м^2 · К). Авторами [53, 54] были проведены исследования, которые показали, что $\alpha_к = 1/R_{КТ} = 1/(2.13 \times 10^{-4}) = 4695$ Вт/(м^2 · К). Следовательно, контактный теплообмен не является "запирающим" процессом при передаче теплового потока биметаллическими ребристыми трубками, если соблюдается технологический регламент накатки ребер.

Использование коррозионно-стойкой стали целесообразно, когда в роли теплоносителя выступает аммиак (например, у компании Alfa Laval в серии Blue BC & BN). При применении других фреонов в той же серии теплообменников для базовых трубок можно ограничиться медью. Материал оребрения – алюминий серии 1000 или более стойкий сплав 5052 [55, 56].

В [57] авторы сравнивают теплообменник с алюминиевыми ребрами и трубками с теплообменником с алюминиевыми ребрами и медными трубками по параметрам стоимости единицы материала, отнесенной к единице теплопередачи, и теплового потока, отнесенного к единице массы оребренной трубки. Установлено, что стоимость теплообменника с базовыми алюминиевыми трубками равна 8% стоимости теплообменника с базовыми медными трубками.

Теплообменник с алюминиевой трубкой и ребрами описан в [20], что свидетельствует о наличии нормативной базы для данного материального исполнения. Алюминиевые трубки не только экономичны ввиду меньшей массы, но и пригодны для повторного использования [58].

Вследствие обдува конденсатора воздухом возможно накопление пыли и бактерий между его ребрами. Во избежание этого в [58] предложили наносить на ребра конденсатора гидрофобное покрытие на основе эпоксидной смолы, которая препятствует накоплению пыли и бактерий из-за снижения шероховатости. Такое покрытие особенно актуально в зонах с повышенным загрязнением воздуха или на морских побережьях.

Гидрофобное покрытие на ребрах конденсатора обеспечивает более гладкую поверхность, замедляет процесс загрязнения, тем самым сохраняются неизменными теплообменные характеристики и продлевается срок службы теплообменника. В качестве материала ребер используют алюминий марок 1100, 3003, 6061, 5052, для гидрофобного покрытия выбирают эпоксидную смолу, полиэтилентерефталат или поливинилиденфторид [59].

Исполнения корпуса АВО в нормативной документации рекомендованы [50] из конструкционной низколегированной стали (09Г2С) или коррозионно-стойкой стали (15Х5М, 12Х18Н10Т, 08Х22Н6Т). Изготовитель АВО Alfa Laval в серии Blue BC & BN выпускает корпус из коррозионностойкого оцинкованного стального листа с двусторонним белым эпоксидным покрытием RAL 9002.

Повышенные требования к коррозионной стойкости материала корпуса обусловлены более широким его применением, а в условиях конкретной задачи можно отталкиваться от стоимости металла.

Анализ возможного материального исполнения воздушных ребристо-трубных фреоновых конденсаторов ORC-установки показал, что оптимальными материалами для теплообменной части являются биметаллические трубки с основной трубкой из меди марки М1р и накатными ребрами из алюминия марки 1013 или 3003 с гидрофобным покрытием из эпоксидной смолы.

МИКРОКАНАЛЬНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК

Микроканальный теплообменник представляет собой разновидность ребристо-трубных теплообменников, но не может выпускаться биметаллическим – он выполняется из одного металла, чаще всего алюминия. Кроме определенных достоинств микроканальных алюминиевых теплообменников, таких как небольшие масса и габариты, выбор алюминия обусловлен также технологией изготовления из него плоских прямоугольных трубок с микроканалами, которые обычно получают методом экструзии [60]. Из алюминия можно формовать поверхности теплообмена любых конфигураций. Также этот металл пластичен, коррозионно-стоек, имеет высокую механическую прочность [60]. Теплообменники из алюминия максимально легкие и компактные. Материалы, обычно применяемые для изготовления элементов и узлов микроканальных теплообменников, представлены в табл. 4.

Большинство производителей выполняют микроканальные трубки методом экструзии из алюминия серий 1050, 1100 или их сплавов (3003 или 3103, причем серия 3000 имеет лучшие механические свойства по сравнению с серией 1000) [60, 62]. Микроканальная трубка от компании Danfoss [63] изготовлена из алюминия марки 3102 с ребрами из алюминиевого сплава 3003MOD (модифицированный). Стоит отметить, что ши-

[4] М – мягкое (отожженное), материал имеет высокую пластичность и стабильность размеров (низкий коэффициент температурного расширения).

Таблица 4. Материальное исполнение элементов микроканальных теплообменников (конденсаторов)

Элемент	Сплав	Химические символы	Российский аналог	Свойства		Изготовители микроканальных трубок/ теплообменников
				λ, Вт/(м · К)	$\sigma_в/\sigma_т/\delta_5$, МПа/МПа/%	
Микроканальные трубки	3003	$AlMn_1Cu$	АМц [55]	180 [61]	95/35/20 [62]	[62]
	1050[1, 2]	–	АД0 [55]	236 [61]	60/20/23 [62]	[60, 62]
	1100[1, 2]	–	Д1 [55]	130 [61]	75/20/20 [62]	
	1197[2]	–	Д19П [55]	138 [61]	–	[62]
	3102[2]	–	–	217 [61]	75/30/22 [62]	[62–64]
	3026[2]	–	–	–	85/35/20 [62]	[62]
	EN AW-4046	$AlSi_{10}Mg$[3]	АК9 [65]	163 [66]	296/102/50 [66]	[66]
Ребра (плавники)	EN AW-4043A	$AlSi_5$	АК5	163 [61]	145/70/22	
	3003MOD	–	–	–	–	[63]
Коллекторы в микроканальных трубках	AA4045+ + AA3005-H14 или AA3003-H14	–	АМг6л [55]	122 [61]	375/275/65	[60]

[1]Получен методом экструзии.

[2]Chalco выпускает твердостью H12 (нагартован до твердости 25%).

[3]Порошковый материал для L-PBF – технологии 3D-печати металлом.

рина каналов в такой трубке около 1 мм, высота 0.3 мм, стенки ребра имеют толщину 0.08 мм.

Для увеличения коррозионной стойкости алюминиевых микроканальных трубок компания “Ридан” [64] предлагает на выбор несколько видов покрытия: цинковое, из эпоксидной смолы, с ионами хрома. Покрытие из цинка выполняется электродуговым напылением и не оказывает влияния на производительность теплообменника. Если для создания покрытия используют эпоксидную смолу, погружая в нее трубки, то сечение каналов в них уменьшается и увеличивается сопротивление воздуха.

Ребра микроканальных теплообменных аппаратов могут быть изготовлены из тех же материалов, что и трубка (серия 3000), а также из улучшенных материалов, таких как 3003MOD [63] или сплав серии 4000 (Al–Si).

Коллекторы в микроканальных трубках имеют круглую форму и производятся из алюминиевого сплава 4045. Этот сплав поставляется с плакирующими слоями 3005-H14 или 3003-H14, которые обеспечивают улучшение характеристик при пайке и повышенную коррозионную стойкость [60].

Для оптимального соединения ребер и микроканальных трубок в таком аппарате компания “Ридан” проводит цельную пайку NOCOLOK. Во-первых, это уменьшает контактное тепловое сопротивление, во-вторых, контакт Al–Al не имеет разности электрических потенциалов, вследствие чего теплообменник обладает высокой коррозионной стойкостью [64].

Кроме методов экструдирования, для получения микроканальных трубок может применяться метод деформирующего резания [67] или метод L-PBF (технология 3D-печати металлом) [66].

Обычно детали, изготовленные по технологии 3D-печати металлом, имеют меньшую прочность из-за своей пористости, что является проблемой аддитивного производства. Даже незначительные уровни пористости в L-PBF [около 1% (по объему)], могут привести к снижению способности выдерживать давление и повышенному риску разгерметизации каналов трубок [66]. Но при правильных настройках печати и выборе материала можно достичь результата, при котором произведенные компоненты будут соответствовать требуемым стандартам для их предполагаемого применения при условии исчерпывающих сведений об их структурной целостности и эксплуатационных возможностях. При создании микроканальных трубок методом L-PBF используется в основном порошок $AlSi_{10}Mg$. Прочностные характеристики материала, полученного методом 3D-печати, представлены в табл. 4.

Анализ микроканальных теплообменников для ORC-установки показал, что для трубок, изготовленных методом экструзии, а также коллекторов рекомендуются алюминиевые сплавы серии 3000 с цинковым покрытием. Для ребер выбирают такой же материал или модифицированный сплав, например 3003MOD.

ПЛАСТИНЧАТО-РЕБРИСТЫЙ РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕННИК

По мнению авторов [1], в качестве регенеративного теплообменника ORC-установки подходит пластинчато-ребристый аппарат, обеспечиваю-

Таблица 5. Материалы для производства пластинчато-ребристых теплообменников

Компонент	Обозначение сплава согласно EN	Максимально применимая расчетная температура, °C	Обозначение марок по российской классификации	λ при 100°C, Вт/(м · K)	Техническая документация оборудования изготовителей
Теплопередающее/распределительное ребро, боковая/центральная планка	AW-3003 [68]	250 [68]	АМц [55]	180 [61]	[69] [70]
Разделительная/кровельная пластина	AW-3003 [68]	250 [68]	АМц [55]	180 [61]	[69]
Коллектор	AW-5754 [68]	100 [68]	АМг3 [55]	151 [61]	–
	AW-5083 [68]	65 [68]	АМг4.5 [55]	126 [61]	[69]
	ASME 5454 [68]	204 [68]	–	–	[69] (под заказ)
Штуцер	AW-5754 [68]	100 [68]	АМг3 [55]	151	–

щий максимальную компактность и термодинамическую эффективность при нагреве потока жидкого фреона вследствие охлаждения газообразного фреона после турбины. Основной элемент в пластинчато-ребристом аппарате – гофрированная теплообменная поверхность. С обеих сторон этой поверхности находится фреон, который инертен по отношению ко многим металлам.

Как правило, пластинчато-ребристые аппараты и все их элементы изготавливаются из алюминия или его сплавов.

На сегодняшний день актуален ГОСТ ISO 15547-2-2016 [68], посвященный непосредственно паяным алюминиевым теплообменникам с пластинчатым оребрением, в котором представлены рекомендуемые марки алюминия и алюминиевых сплавов для изготовления разных частей пластинчато-ребристого аппарата (табл. 5).

При производстве пластинчато-ребристых теплообменников обычно используют алюминиевые сплавы. Для теплопередающих ребер чаще выбирают сплав серии 3003. В [70] отмечено, что он может быть плакирован, типичным плакированием является двустороннее, например, силумином 4343/3003/4343 [56]. При выборе этого метода улучшается пайка и повышается коррозионная стойкость.

Алюминиевый сплав, применяемый в теплообменниках, может быть нагартован (H14/H16) до определенной твердости или отожжен (H24) [70]. Приведенные значения соответствуют классификации Temper, установленной Международной системой обозначения сплавов (IADS)[5]. В российской системе обоначений H2 означает полунагартованные, М – отожженные, Т – закаленные [71]. При увеличении процента нагартовки прочность (временное сопротивление и предел текучести) увеличивается, а относительное удлинение, т.е. пластичность, уменьшается. При отжиге пластичность значительно выше, чем при нагартовке и в случае отсутствия термической обработки, но прочность ниже в обоих случаях [71].

В справочнике [52] отмечено, что выбор материала пластинчато-ребристых теплообменников зависит от расчетных предельных значений давления и температуры, а также от требуемой стойкости к воздействию агрессивных сред. Основные конструкционные материалы для компактных теплообменников – алюминий, углеродистая и коррозионно-стойкая стали [73]. Но углеродистую сталь целесообразно применять в диапазоне температур от 250 до 480°C, а коррозионно-стойкую сталь – в диапазоне от 250 до 650°C. Алюминиевые сплавы же рекомендованы при температурах до 250°C. Таким образом, при температурных условиях регенерации фреона алюминий является наиболее подходящим металлом. Из-за низкой плотности он имеет небольшую массу, низкую стоимость и обладает высокой теплопроводностью.

Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов под действием фреона меняется от “стойкой” до “нестойкой” при температурах от 20°C до кипения фреона (70–220°C) [21]. В отсутствие влаги алюминиевый сплав является стойким до 175°C [27].

В случае, когда алюминий неприменим по критерию коррозионной стойкости, возможно использование меди.

Для рассматриваемого варианта ORC-установки предполагается, что температура в регенераторе достигает примерно 100°C, т.е. коррозионная стойкость алюминия и его сплавов обеспечивается. Однако кроме коррозионных свойств ГОСТ ISO 15547-2-2016 [68] определяет технологические требования к материалу.

[5] H14 – нагартованный до твердости 50%, H16 – до 75%, H24 – частичный отжиг до твердости 50% после наклепа [72].

В конструкции изделия учитывается состояние, вызванное термическими нагрузками, при следующих допущениях:

местная разница температур между любыми двумя соседними теплопередающими потоками составляет 50°C;

местная разница температур между любыми двумя соседними теплопередающими потоками при двухфазном потоке, нестационарном режиме или при циклических изменениях составляет 30°C.

Коллекторы и штуцеры не должны обладать высокой теплопроводностью, но должны быть прочными, как и соединения, выполненные пайкой или сваркой. Из предложенных в [68] материалов можно остановиться на AW-5754, который обладает отличной свариваемостью, хорошей стойкостью к коррозии и имеет расчетную температуру 100°C.

Согласно [68], теплопередающие и распределительные ребра, а также боковую и центральную планки рекомендовано выполнять из сплава 3003 с максимальной расчетной температурой 250°C.

На заводе емкостного и промышленного оборудования в г. Екатеринбурге [69] при производстве пластинчато-ребристых теплообменников их элементы делают из алюминиевого сплава 3003, а коллекторы и штуцеры – из сплава 5083. При изготовлении аппарата под заказ возможно применение высокотемпературных материалов, например ASTM 5454 [69].

Обзор литературных источников и анализ документации, выполненные авторами настоящей статьи, позволяют сделать вывод, что для изготовления теплопередающих ребер пластинчато-ребристого аппарата оптимальным материалом является алюминиевый сплав 3003 с силуминовым покрытием. Этот материал, как и любой алюминиевый сплав, имеет малую массу, высокую коррозионную стойкость и один из самых высоких коэффициентов теплопроводности среди алюминиевых сплавов (см. табл. 5). В качестве материала коллекторов и штуцеров также целесообразно использовать алюминиевый сплав 3003, так как он обладает отличной свариваемостью и хорошей стойкостью к коррозии.

ПРОКЛАДКИ

Важными элементами конструкции теплообменников являются прокладки (уплотнители), материалы для которых также необходимо подбирать.

В кожухотрубных теплообменниках прокладки нужны для герметичного соединения трубок с трубной решеткой, предотвращения смешивания теплоносителей и компенсации неравномерных температурных деформаций. Прокладки могут быть изготовлены из разных материалов в зависимости от их функционального назначения и расположения: для межтрубного пространства, плавающей головки, изоляции корпуса или камеры, компенсатора.

Согласно [5, 6], для кожухотрубных теплообменников следует выбирать прокладки и материалы для них, перечисленные в [72, 74], например паронит [72] или картон хризотиловый[6] [75].

Материалы, рекомендуемые для уплотнения и герметизации теплообменников, представлены в табл. 6. Однако с учетом условий эксплуатации аппаратов допускается изготовление прокладок и из других материалов [76].

В уплотнениях различных конструкций применяют неметаллические и асбометаллические прокладки [40]. Для кожухотрубного теплообменника с плавающей головкой, согласно нормативной документации [5], прокладки для крышек плавающих головок должны быть изготовлены на металлическом зубчатом основании, покрытом терморасширенным графитом. Прокладки из такого графита должны использоваться в оболочке из коррозионно-стойкой стали [74]. В [35] для прокладок плавающих головок в зависимости от материального исполнения трубных решеток и крышки рекомендуются углеродистые и коррозионно-стойкие стали, а также алюминий и латунь.

В качестве уплотнения подвижной трубной решетки у аппаратов от компании Alfa Laval в конденсаторах серии CFC, CRS, CPLUS, ACFL и CDEW [13] применяется каучук на основе сополимера этилена, пропилена и диенового мономера Ethylene Propylene Diene Monomer (EPDM). Данный уплотнитель не должен соприкасаться с маслами, бензинами и бензолами, но может контактировать с водными средами, паром, антифризами, слабоагрессивными жидкостями.

Для неподвижных трубных решеток прокладки фланцевых соединений крышки выполняются по [6, 72]: из картона хризотилового по ГОСТ 2850 [75] в оболочке из алюминия.

В пластинчатых теплообменниках прокладки необходимы для обеспечения герметичности между пластинами, чтобы избежать смешивания жидкостей, циркулирующих в теплообменнике, и предотвратить их утечки. Полусварные теплообменники собирают из попарно сваренных по периметру пластин, между которыми для уплотнения помещают резиновые прокладки [40]. В пластинчатых теплообменниках Danfoss серии SW (Semi-Welded – полусварной) используются кольцевые уплотнения CR (Chloroprene Rubber seals – неопреновое уплотнение), HNBR (Hydrogenated Nitrile Butadiene Rubber – гидрогенизированный нитрилбутадиеновый каучук), NBR (Ni-

[6] До 2022 г. ГОСТ 2850 [75] назывался “Картон асбестовый”, с 2022 г. – “Картон хризотилцементный”.

Таблица 6. Применение и характеристики материалов прокладок

Материал (обозначение, номер)	Рабочая температура, °С		Аппаратурное применение
	максимальная	минимальная	
Картон хризотиловый в оболочке из алюминия [74]	Около 200	Около −20	Для теплообменников с кожухом/крышкой/распределительной камерой из углеродистой стали [6]
Картон хризотиловый в оболочке из стали [74]	Около 200	Около −20	Для теплообменников с кожухом/крышкой/распределительной камерой из коррозионно-стойкой стали [6]
Резина по ГОСТ 7338-90	Около 80	Около −45	В серии ESK и ESK.D [17]
Паронит ПОН Б по ГОСТ 481-80	Около 200	−40	Пластинчатый теплообменник [41]
EPDM	150 [44] 160 [41]	−30 [44, 41]	Передняя прокладка в кожухотрубных конденсаторах [13] (не совместимы с маслами)
NBR (Nitril)/ ИРП-1078 по ТУ 2512-046-00152081-2003	150 [41]	−15 [41]	Прокладки пластинчатых теплообменников [41]
NBR HT	140 [44]	−20 [44]	Полусварные пластинчатые теплообменники Danfoss серия SW (для R717 или аммиака) (устанавливается на стороне охлаждаемой среды) [46]
FPM (Viton)/ ИРП-1287НТА по ТУ 38.0051166-98	200 [41]	−10 [41]	Прокладки пластинчатых теплообменников [41]; со стороны хладагента и на стороне охлаждаемой среды [46]; не используется с титановыми пластинами [46]
Клингерит	–	–	Уплотняющие кольца в кожухотрубных конденсаторах серии RKMDEW [41]
CR	–	–	В пластинчатых теплообменниках фирмы Alfa Laval со стороны хладагента [46]

trile Butadiene Rubber), NBR HT, NBR LT, EPDM HT и диагональные уплотнения NBR HT, EPDM HT, CR. Материалы на основе каучука с префиксом HT означают вспененные, LT – для низких температур. В серии SW от компании Danfoss из данных материалов изготавливаются малоаммиачные пластинчатые теплообменники [43]. Их свойства и область применения представлены в табл. 6.

Компания “Ридан” в пластинчатых теплообменниках [41] использует межпластинчатые резиновые прокладки [77] и межфланцевые прокладки из паронита ПОН Б [72].

Оптимальным материалом для межпластинчатых прокладок можно считать резину, произведенную по ГОСТ 7338 [77], а также этиленпропиленовый каучук (EPDM), так как он обладает хорошей устойчивостью к фреону и может сохранять свои физические и химические свойства в его среде. Каучук устойчив ко многим средам, в том числе к воде, обладает низкой химической активностью по отношению к фреонам R114, R13, R134a, R22 [78].

В последнее время большинство производителей отказываются от использования асбеста в теплоизоляционных и строительных материалах, при изготовлении трубок и уплотнителей. По этой причине стали популярными так называемые безасбестовые материалы. Вместо асбестовых прокладок применяют прокладки из клингерита – смеси каучука с хризотиловыми волокнами (формально это уже не асбестовый материал).

В микроканальном теплообменнике имеются сварные соединения с входными медными трубками. Во избежание гальванической коррозии и для защиты от влаги в месте соединения меди и алюминия устанавливают термоусадочную трубку, которая может быть изготовлена из пластмассы, резины или пеноматериала [63].

Таким образом, почти все уплотнительные и герметизирующие материалы для рассмотренных ранее аппаратов могут быть произведены на основе синтетического каучука и хризотила (производного асбеста). Основываясь на опыте изготовителей, для межпластинчатых прокладок в пластинчатом теплообменнике и уплотнений трубной решетки в кожухотрубных теплообменниках (без присутствия масла) можно использовать EPDM. Прокладки для крышек плавающих головок у кожухотрубного теплообменника реко-

мендуется выполнять с оболочкой из коррозионно-стойкой стали и наполнителем из терморасширенного графита.

Любой из синтетических каучуков (EPDM, NBR) можно применять для изолирования алюминия от другого металла во избежание гальванической коррозии.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАЗРАБОТКИ

В настоящее время в литературных источниках можно найти описания исследований, основанных на математическом моделировании, в процессе которых была получена новая информация об объектах – теплообменных аппаратах, изготовленных из экспериментальных материалов. Например, в [79] приведено численное сравнение производительностей теплообменников из сверхтонкого графитового материала и алюминиевого пластинчато-ребристого. Математическая модель выполнена не в системе “фреон – фреон”, а в условной системе “вода – воздух”. Базируясь на результатах исследований, авторы [79] заявляют, что устройство из графита превосходит устройство из алюминия (уводит более 20% энергии в поток воздуха при числах Рейнольдса 3000–4000), при этом они утверждают, что ребра толщиной примерно 7.0 мкм условного ультратонкого пластинчато-ребристого теплообменника работают так же, как и алюминиевые ребра толщиной 75.0 мкм.

В [80] представлены экспериментальные и расчетные данные, полученные при исследовании теплообмена в аппаратах с металлической пеной. Приведены характеристики процесса теплопередачи к потоку охлаждающего воздуха через различные вспененные алюминиевые и медные образцы разной пористости и удельной площади поверхности. Использование вспененного материала может быть актуально при изготовлении ребер ребристо-трубного конденсатора с воздушным охлаждением.

В [81] рассматривается микроканальный теплообменник с оребрением из вспененной меди, который сравнивают с теплообменником со сплошными ребрами, ширина которых равна ширине канала. Показано, что коэффициент теплопередачи для аппаратов с оребрением из вспененной меди выше (до 60%), чем при сплошном оребрении, при относительно небольшом тепловом потоке (до 100 Вт/см^2). При более высоких тепловых потоках теплопередача ребристого теплообменника из медной пены ухудшается. В [81] представлены экспериментальные данные, отмечено, что падение давления уменьшается при критическом тепловом потоке.

Много публикаций посвящено теплообменникам, в которых теплообменная часть выполнена из полимерных материалов. В [82] кожухотрубный полимерный теплообменник рассматривается как испаритель на геотермальной ORC-установке. При расчетах в качестве рабочей жидкости был принят пентафторпропан (R245fa), а в качестве рассола – геотермальная жидкость Флегрейских полей (юг Италии) (известного состава и заданной температуры). Проводилось сравнение коэффициентов теплопередачи для поверхностей теплообмена аппаратов, изготовленных из титана, углеродистой стали, коррозионно-стойкой стали и полиэтилена высокой плотности. Согласно полученным данным, при использовании пластикового испарителя площадь поверхности теплообмена увеличивается на 47%, а затраты на установку снижаются на 48% относительно таковых для титанового испарителя. Теплопроводность пластика обычно составляет приблизительно 1% теплопроводности металлических материалов. Этот факт определяет характеристики теплопередачи: требуется большая площадь поверхности для теплообмена [82].

В [83] исследовали аппарат с ребристыми трубками из модифицированного полипропилена, аналогичный по конструкции ребристо-трубному конденсатору. Модификация полимера была необходима для повышения теплопроводности. В [83] рассматривалась гипотеза о том, что эффективная теплопроводность наполненных материалов в большей степени зависит от формы и состава наполнителя, нежели от тепловых свойств их компонентов. Поэтому создание анизотропного полимера с помощью одномерных и двумерных частиц эффективнее. С помощью теплопроводящих частиц наполнителя теплопроводность была увеличена с 0.2 до 2.3 и 16.5 Вт/(м · K). В качестве частиц применялись углеродные волокна, углеродные или металлические пластинки и металлические сферы. Выполнялось сравнение теплообменника с ребристыми трубками, изготовленного из титана и полипропилена, полученного методом литья под давлением. При теплопроводности пластика более 15 Вт/(м · K) теплообменник может достигнуть более 95% производительности титанового теплообменника и 84% производительности алюминиевого или медного теплообменника тех же размеров.

В [84] были проведены аналогичные экспериментальные исследования ребристо-трубчатого теплообменника из композита на основе полиамида-66. В результате обработки полученных данных было показано, что теплообмен улучшился с 46.06 до 73.05% при снижении массы аппарата с 30.5 до 62.2%.

В [85] рассматриваются достижения в области аддитивного производства полимеров, которые были использованы для создания нового высокоэффективного противоточного микроштыревого

полимерного теплообменника для АВО. Пластины этого теплообменника были напечатаны на 3D-принтере в процессе цифрового светового синтеза. В качестве материала для изготовления окончательного варианта печатного теплообменника была выбрана фотополимерная смола EPX-82 (эпоксидная), поскольку она имеет хорошие механические свойства. При сравнении металлического ребристо-трубчатого и такого же по размеру микроштыревого полимерного теплообменников при одинаковых входных данных оказалось, что у полимерного теплообменника передача тепловой энергии на 55% больше.

Можно заметить, что теплообменники из полимерных материалов появились благодаря возможности модифицировать известные полимеры, а также использовать новые технологии изготовления. У полимеров есть неоспоримые достоинства: низкая плотность, невысокая стоимость, противообрастающие и антикоррозионные свойства. Пенные металлические материалы актуальны при относительно небольших тепловых потоках, но всегда есть вероятность закупорки пор мелкопористых материалов вследствие их зарастания, образования в них конденсата и т.д.

ВЫВОДЫ

1. Обзор материального исполнения основных теплообменных аппаратов термомасляной ORC-установки выполнялся на основе изучения нормативно-технической документации (ГОСТ), каталогов прототипов оборудования ведущих производителей и научной литературы. В большинстве случаев многие из предложенных в ГОСТ материалов не использовались ввиду их “избыточности”. Диапазон применимости теплообменных аппаратов, для которых созданы нормативные документы, значительно шире, чем для рассматриваемой технологии. Изученные каталоги оборудования, по мнению авторов настоящей статьи, сильно сужают перечень материалов, которые можно использовать, и ограничивают выбор минимальным количеством критериев. Новые материалы, представленные в научно-технической литературе, находятся на стадии исследования характеристик и областей применимости, еще не внедрены в промышленность и не нашли отражения в стандартах.

2. Для всех конструкций аппаратов рассматриваемой термомасляной ORC-установки можно подобрать уже апробированное материальное исполнение, обеспечивающее хорошее соответствие большинству основных критериев: коррозионной стойкости, теплопроводности, пластичности и прочности, технологическим свойствам, длительности эксплуатации аппаратов. При этом для некоторых аппаратов возможны альтернативные решения по техническим и технологическим характеристикам, что имеет принципиальное значение для оценки стоимости их изготовления. Следует отметить доступность рекомендованных в настоящей работе материалов для изготовления всех рассматриваемых аппаратов термомасляной ORC-установки и наличие их российских аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Конструктивные** решения для основных теплообменных аппаратов ORC-контура (обзор) / И.С. Антаненкова, Ю.А. Геллер, М.М. Виноградов, Е.А. Горбунова, Д.С. Писарев, В.И. Кузнецов // Теплоэнергетика. 2024. № 8. С. 3–23. https://doi.org/10.56304/S0040363624700103
2. **ГОСТ 550-2020.** Трубы стальные бесшовные для нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2020. Введ. в действие с 01.04.2021.
3. **Стали** и сплавы. Марочник: справ. изд. / В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев, В.С. Палеев, И.В. Гервасьева, С.Я. Палеева; под ред. В.Г. Сорокина, М.А. Гервасьева. М.: Интермет Инжиниринг, 2001.
4. **ГОСТ 5520-2017.** Прокат толстолистовой из нелегированной и легированной стали для котлов и сосудов, работающих под давлением. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2018. Введ. в действие с 01.10.2018.
5. **СТО ИНТИ S.40.3-2022.** Теплообменники кожухотрубчатые. Общие технические условия. ИНТИ. [Электрон. ресурс.] https://inti.expert/upload/iblock/4a5/a3vqp32bnrcscjbs6pfd9bnuwd9d99ah/%D0%A1%D0%A2%D0%9E%20%D0%98%D0%9D%D0%A2%D0%98%20S.40.3-2022%20Rus.pdf
6. **ТУ 3612-024-00220302-02.** Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе. М.: ВНИИнефтемаш, 2002.
7. **ГОСТ 21646-2003.** Трубы медные и латунные для теплообменных аппаратов. Технические условия. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2004. Введ. в действие с 01.09.2004.
8. **Осинцев О.Е., Федоров В.Н.** Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Инновационное машиностроение, 2004.
9. **ГОСТ 9941-2022.** Трубы бесшовные холоднодеформированные из коррозионно-стойких высоколегированных сталей. Технические условия. М.: Институт стандартизации, 2023. Введ. в действие с 01.08.2023.
10. **Кожухотрубные** испарители и конденсаторы. Серия АНФ. Каталог компании АНВИТЭК. [Электрон. ресурс.] https://xn–90ahbmaldjkagak4b.xn–p1ai/media/attachment/file/f/i/file_176.pdf

11. **Каталог** производителя Wuxi New Wuhuan Energy Saving Technology Co., Ltd. [Электрон. ресурс.] https://xinwuhuan.en.made-in-china.com/
12. **DIN EN 12735-2-2016.** Медь и медные сплавы. Бесшовные медные трубы круглого сечения для холодильной техники и техники кондиционирования воздуха. Часть 2. Трубы для оборудования. Введ. в действие с 01.11.2016.
13. **Каталог** оборудования Alfa Laval. [Электрон. ресурс.] https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/alfa-laval
14. **Refkar RK.** Сер. Кожухотрубные конденсаторы. [Электрон. ресурс.] https://refkar.com/rk-serisi-kondenser-ru/
15. **Технический** каталог компании WTK. [Электрон. ресурс.] https://phk-holod.ru/file/PDF/Teploobmennik/WTK.pdf
16. **Сайт** компании Bitzer. [Электрон. ресурс.] https://www.bitzer.de/
17. **Системы** охлаждения. Каталог оборудования компании “Ангара”. [Электрон. ресурс.] https://teploobmenniki.pro/upload/iblock/2d0/2d026af63fcc0c35a3655927ba0868c8.pdf
18. **Кожухотрубные** испарители Dryplus-3. Каталог оборудования компании “Альфа Лаваль Поток”. [Электрон. ресурс.] https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/alfa-laval/10280/28146.pdf
19. **СТО 00220368-014-2009.** Крепление труб в трубных решетках кожухотрубчатых теплообменных аппаратов и АВО. Общие технические требования. Волгоград: ВНИИПТхимнефтеаппаратуры, 2009. Утв. и введ. в действие 24.12.2008.
20. **ГОСТ Р 55601-2013.** Аппараты теплообменные и аппараты воздушного охлаждения. Крепление труб в трубных решетках. М.: Стандартинформ, 2014. Утв. и введ. в действие 06.09.2019 (переизд.).
21. **Теплоотдача** и потери давления в основных теплообменных аппаратах термомасляной ORC-установки (обзор) / И.С. Антаненкова, Ю.А. Геллер, М.М. Виноградов, Е.А. Горбунова, В.И. Кузнецов // Теплоэнергетика. 2025. № 1. С. 55–78. https://doi.org/10.56304/S0040363624700541
22. **Каталог** компании “Софэкс-Силикон”. [Электрон. ресурс.] https://www.sofex-silicone.ru/catalog/view_goods/140
23. **Каталог** теплоносителей “Росма”. [Электрон. ресурс.] https://www.rosma.ru/catalogue/thermofors/
24. **Каталог** компании Schultz Canada Chemicals Ltd. [Электрон. ресурс.] https://schultzchem.guidechem.com/
25. **Каталог** теплоносителей “Эни-центр”. [Электрон. ресурс.] https://eni-center.ru/katalog/promyshlennost/masla-teplonositeli/agip-alaria
26. **Туфанов Д.Г.** Коррозионная стойкость нержавеющих сталей и чистых металлов: справ. 3-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1973.
27. **Воробьёва Г.Я.** Коррозионная стойкость материалов в агрессивных средах химических производств. М.: Химия, 1975.
28. **Лысенко Л.В., Алешин М.С., Комелев Л.А.** Номенклатурный справочник теплообменников Калужского турбинного завода. Калуга: ООО “КОНТУР ЛТД”, 1998.
29. **Новые** маслоохладители для турбин большой мощности ЗАО УТЗ / Ю.М. Бродов, А.Ю. Рябчиков, К.Э. Аронсон, Н.В. Желонкин // Теплоэнергетика. 2014. № 12. С. 42–46. https://doi.org/10.1134/S0040363614120017
30. **ГОСТ 33662.2-2015 (ISO 5149-2:2014).** Холодильные системы и тепловые насосы. Требования безопасности и охраны окружающей среды. Часть 2. Проектирование, конструкция, изготовление, испытания, маркировка и документация. М.: Стандартинформ, 2016.
31. **Медные** трубы. Охлаждение и кондиционирование воздуха. HALCOR. [Электрон. ресурс.] https://halcor.com/userfiles/OtherLanguagesBrochures/ACR_RUS_v6.pdf
32. **ГОСТ 10092-2006.** Трубы мельхиоровые для теплообменных аппаратов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2007. Введ. в действие с 01.01.2008.
33. **Каталог** компании Refkar. [Электрон. ресурс.] https://refkar.com/kataloglar-RU/
34. **Кондрашова Н.Г., Лашутина Н.Г.** Холодильно-компрессорные машины и установки. 2-е изд. М.: Высшая школа, 1973.
35. **ТУ 3612-023-00220302-0-1.** Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с плавающей головкой, кожухотрубчатые с U-образными трубами и трубные пучки к ним. М.: ВНИИнефтемаш, 2001.
36. **Шумахер М.** Морская коррозия: справ. / сокр. пер. с англ. П.П. Поздеева, Б.И. Розенфельда; под ред. И.А. Степанова. М.: Металлургия, 1983.
37. **Брегман Дж.** Ингибиторы коррозии / пер. с англ.; под ред. Л.И. Антропова. М.; Л.: Химия, 1966.
38. **Nattah A.M., Salim A.M., Dawood N.M.** Influence of nano chromium addition on the corrosion and erosion-corrosion behavior of cupronickel 70/30 alloy in seawater // Open Eng. 2023. V. 13. Is. 1. P. 20220491. https://doi.org/10.1515/eng-2022-0491
39. **Microbiologically** influenced corrosion of 70/30 cupronickel tubes of a heat-exchanger / K. Chandra, Amrita Mahanti, A.P. Singh, V. Kain, H.G. Gujar // Eng. Failure Anal. 2019. V. 105. P. 1328–1339. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.08.005
40. **Теплообменные** аппараты холодильных установок. 2-е изд., перераб. и доп. / Г.Н. Данилова, С.Н. Богданов, О.П. Иванов, Н.М. Медникова, Э.И. Крамской; под общ. ред. Г.Н. Даниловой. Л.: Машиностроение, 1986.
41. **Разборные** пластинчатые теплообменники: Каталог компании “Ридан”. [Электрон. ресурс.] https://ridan.ru/
42. **ГОСТ 15518-87.** Аппараты теплообменные пластинчатые. Типы, параметры и основные размеры. М.: Изд-во стандартов, 1999. Введ. в действие с 01.01.1990.
43. **Продукты** и решения “Данфосс” для малоаммиакоемких систем. [Электрон. ресурс.] https://lineng.by/wp-content/uploads/2021/12/Danfoss-dlya-maloammiakoemkih-sistem.pdf?ysclid=m7rx4yvltf510201815

44. **Каталог** продукции “Техэнергоприбор”. [Электрон. ресурс.] http://techenpribor.ru/
45. **Каталог** продукции Funke. [Электрон. ресурс.] https://funke-rus.ru/
46. **Пластинчатые** теплообменники для систем холодоснабжения: Каталог полусварных и сварных пластинчатых теплообменников Alfa Laval. [Электрон. ресурс.] https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/alfa-laval/10289/28154.pdf
47. **Мещеряков Ф.Е.** Основы холодильной техники и холодильной технологии. М.: Пищевая пром-сть, 1975.
48. **AlfaGreen** – воздушные конденсаторы: Каталог оборудования компании Alfa Laval. [Электрон. ресурс.] https://www.c-o-k.ru/library/catalogs/alfa-laval/10281/28147.pdf
49. **Мильман О.О., Ананьев П.А.** Воздушно-конденсационные установки в тепловой энергетике (обзор) // Теплоэнергетика. 2020. № 12. С. 15–36. https://doi.org/10.1134/S004036362012005X
50. **ГОСТ Р 51364-99 (ИСО 6758-80).** Аппараты воздушного охлаждения. Общие технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2000. Принят и введ. в действие 25.11.1999.
51. **Каталог** продукции Termoflow. [Электрон. ресурс.] https://termoflow.ru/
52. **Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М.** Справочник по теплообменным аппаратам. М.: Машиностроение, 1989.
53. **Теплоаэродинамические** исследования шахматных пучков для выбора эффективного шага круглоребристых труб / В.Б. Кунтыш, А.Б. Сухоцкий, Г.С. Маршалова, В.В. Дударев, В.Н. Фарафонтов // Изв. вузов и энергет. объединений СНГ. Сер. Энергетика. 2019. Т. 62. № 3. С. 264–279. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-264-279
54. **Бессонный А.Н., Дрейцер Г.Л., Кунтыш В.Б.** Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения / под ред. В.Б. Кунтыша, А.Н. Бессонного. СПб.: Недра, 1996.
55. **ГОСТ 4784-2019.** Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки. М.: Стандартинформ, 2019. Введ. в действие с 01.09.2019.
56. **EN 573-3-2009.** Aluminium and aluminium alloys. Chemical composition and form of wrought products. Part 3: Chemical composition and form of products. 2009.
57. **Comprehensive** evaluation of the performances of heat exchangers with aluminum and copper finned tubes / F. Wang, Y. Li, M. Liu, D. Pang, W. Du, Y. Zhang, X. Cheng, T. Gu, W. Guo // Int. J. Chem. Eng. 2023. V. 2023. Is. 1. P. 6666947. https://doi.org/10.1155/2023/6666947
58. **Теплообменники** в системах ОВиК и холодоснабжении. www.promventholod.ru/tekhnicheskaya-biblioteka/
59. **Гидрофобная** алюминиевая фольга. Сайт компании Huasheng Aluminum. [Электрон. ресурс.] https://djaluminum.com/products/hydrophobic-aluminium-foil/?lang=ru
60. **Сайт** компании Wellste. [Электрон. ресурс.] https://www.wellste.com
61. **Марочник** сталей и сплавов. [Электрон. ресурс.] https://oitsp.ru/develop/marochnik-staley-i-splavov
62. **Микроканальные** алюминиевые плоские трубы. [Электрон. ресурс.] https://www.chalcoaluminum.ru/application/aluminum-automotive/auto-micro-channel/
63. **Microchannel** heat exchangers (MCHE). Installation and maintenance guide. Sevice guide Danfoss, 2024. [Электрон. ресурс.] https://assets.danfoss.com/documents/457460/AX292455807588en-000201.pdf
64. **Микроканальные** воздушные теплообменники MCHE. Конденсаторы серии RC. Каталог компании “Ридан”. [Электрон. ресурс.] https://ridan.group/Cooling/Mikrokanal'nye%20kondensatory%20RC%20-%20katalog.pdf
65. **ГОСТ 1583-93.** Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2003. Введ. в действие с 01.01.1997.
66. **Pressure** capacity assessment of L-PBF-produced microchannel heat exchangers / J. An, L. Guo, J. Zou, K. Zhang, Y. Zhong, T. Liu, L. Huang, Y. Chen // Inventions. 2024. V. 9. Is. 5. P. 97. https://doi.org/10.3390/inventions9050097
67. **Зубков Н.Н.** Обработка труб теплообменников деформирующим резанием // Оборудование и инструмент для профессионалов. 2004. № 4 (51). С. 20–22.
68. **ГОСТ ISO 15547-2-2016.** Промышленность нефтяная, нефтехимическая и газовая. Теплообменники пластинчатого типа. Часть 2. Теплообменники паяные алюминиевые с пластинчатым оребрением. Минск: Евразийский совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2016. Утв. 31.08.2016.
69. **Сайт** Завода емкостного и промышленного оборудования. [Электрон. ресурс.] https://zavod-rezervuar.ru
70. **Алюминиевая** радиаторная трубка. Gnee Corten Steel. [Электрон. ресурс.] https://ru.cortensteels.com/finned-tube/aluminum-radiator-fins-tube.html
71. **ГОСТ 21631-2023.** Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2023. Введ. в действие с 01.02.2024.
72. **ГОСТ 481-80.** Паронит и прокладки из него. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2002.
73. **Чичиндаев А.В.** Тепломассообмен влажного воздуха в компактных пластинчато-ребристых теплообменниках. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009.
74. **ГОСТ 28759.7-2022.** Фланцы сосудов и аппаратов. Прокладки в металлической оболочке. Конструкция и размеры. Технические требования. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. Введ. в действие с 01.07.2022.
75. **ГОСТ 2850-2022.** Картон хризотиловый. Технические условия. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. Введ. в действие с 01.06.2023.

76. **ГОСТ 28759.6-2022.** Фланцы сосудов и аппаратов. Прокладки из неметаллических материалов. Конструкция и размеры. Технические требования. М.: Рос. ин-т стандартизации, 2022. Введ. в действие с 01.07.2022.
77. **ГОСТ 7338-90.** Пластины резиновые и резинотканевые. Технические условия. М.: Изд-во стандартов, 2004. Введ. в действие с 01.07.1991.
78. **Таблица** химической стойкости резин. ГидроПарт. [Электрон. ресурс.] https://www.hydropart.ru/tehnicheskie_dokumenti/material/
79. **Analysis** of an ultrathin graphite-based compact heat exchanger / A. Heltzel, C. Mishra, R.S. Ruoff, A. Fleming // Heat Transfer Eng. 2012. V. 33. Is. 11. P. 947–956. https://doi.org/10.1080/01457632.2012.654727
80. **Air** forced convection through metal foams: Experimental results and modeling / S. Mancin, C. Zilio, A. Diani, L. Rossetto // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 62. P. 112–123. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.02.050
81. **Flow** boiling heat transfer in copper foam fin microchannels with different fin widths using R134a / W. Gao, K. Fu, X. Xu, X. Liang // Sci. China Technol. Sci. 2023. V. 66. P. 3245–3258. https://doi.org/10.1007/s11431-022-2440-y
82. **Modelling** of polymeric shell and tube heat exchangers for low-medium temperature geothermal applications / F. Ceglia, A. Macaluso, E. Marrasso, M. Sasso, L. Vanoli // Energies. 2020. V. 13. Is. 11. P. 2737. https://doi.org/10.3390/en13112737
83. **Chen L., Li Z., Guo Z.-Y.** Experimental investigation of plastic finned-tube heat exchangers, with emphasis on material thermal conductivity // Exp. Therm. Fluid Sci. 2009. V. 33. Is. 5. P. 922–928. https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.04.001
84. **High** performance finned-tube heat exchangers based on filled polymer / J. Jabbour, S. Russeil, M. Mobtil, D. Bougeard, M.-F. Lacrampe, P. Krawczak // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 155. P. 620–630. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.036
85. **Rasouli E., Fricke E., Narayanan V.** High efficiency 3-D printed microchannel polymer heat exchangers for air conditioning applications // Sci. Technol. Built Environ. 2022. V. 28. Is. 3. P. 289–306. https://doi.org/10.1080/23744731.2022.2026693

An Analysis and Choice of the Material Embodiment of Heat Exchangers for a Thermal Oil ORC Unit (Review)

Yu. A. Geller[a], *, I. S. Antanenkova[a], M. M. Vinogradov[a], and E. A. Gorbunova[a]

[a] National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

**e-mail: GellerYA@mpei.ru*

Abstract—The article presents a review of the embodiments, in terms of construction material used (or shortly material embodiments), of the main heat transfer devices, namely, a vapor generator, condenser, and regenerative heat exchanger in the case of their optimal—in the authors' opinion—use in the design of a thermal oil ORC unit. A shell-and-tube type device was considered for implementing both the thermal oil heated vapor generator and the water cooled condenser. A semi-welded plate device was also considered as an alternative to the latter. For an air cooled condenser, the material embodiment versions of devices with finned tube and microchannel heat transfer surface, and for the regenerative heat exchanger, versions with a plate-and-finned surface were studied. The choice of the most rational heat transfer, thermal insulation, and structural materials is substantiated with due regard to the specific features of the working media used. The currently-in-force regulatory documents stipulating the material embodiment of heat exchangers with suitable process operating conditions are analyzed, and an attempt is made to put the information in a systematic order using the experience of manufacturers as a basis. It has been found that the published catalogs of industrial equipment do not contain sufficient data on the materials used, technologies for connecting heat transfer elements (tubes with the tube sheet, plates, and heat exchanger components), and working media. As regards the proposals on the choice of material embodiment, they are limited to just one or two solutions. On the contrary, the regulatory documents present more various versions of materials. In the scientific-technical literature, materials that have not been yet put in operation and have not been included in standards are considered; however, they form promising ways for the development of this area. The performed analysis of all of the above-mentioned information sources enabled us to draw up recommendations on the optimal material embodiments for each of the devices considered, which ensure compliance with the unit's operating conditions, including the temperature ones.

Keywords: organic Rankine cycle, ORC unit, thermal oil, Freon, material embodiment, shall-and-tube heat exchanger, plate heat exchanger, microchannel heat exchanger