

Новые нержавеющие кожухотрубные конденсаторы водяного охлаждения: сочетание эффективности и надежности



Е.В.Митин

Производство отечественного холодильного оборудования для нужд атомной энергетики, обороны и космоса является актуальной задачей. Изделия для этих отраслей априори должны отличаться повышенной надежностью и качеством. Настоящая работа посвящена разработке и производству теплообменного оборудования, отвечающего перечисленным выше требованиям – новым нержавеющим кожухотрубным хладоновым конденсаторам водяного охлаждения.



В.П.Ельчинов



Рис.1. Медная труба, оребренная накаткой по винтовой линии (технология ВНИИМетмаш)

В отечественной холодильной практике в кожухотрубных конденсаторах водяного охлаждения обычно используют медные трубы с наружным поперечным оребрением. В трубах течет охлаждающая жидкость – вода. Снаружи на ребрах конденсируется хладон. Оребрение выполняется по технологии, предложенной институтом ВНИИМетмаш –

накатка роликами по винтовой линии на специальных накатных станках. Трубы соединяются с трубной решеткой посредством вальцовки [1].

В ряде случаев, приведенные выше технологические решения малоэффективны, либо вообще не приемлемы. Например, в конденсаторах, которые могут испытывать сейсмические нагрузки, вальцовка недостаточно надежна: прочность механического контакта медных труб и трубной решетки может быть нарушена при деформациях (вибрациях), что приводит к протечкам и смешиванию теплоносителей. Кроме этого, технология вальцовки достаточно сложна, требует точной геометрии труб и тщательной подготовки поверхностей отверстий в трубных решетках (заданная шероховатость, наличие канавок, очистка от загрязнений и т.д.).

На практике трубки приходится часто перевальцовывать.

Применение меди в качестве материала труб оправдано вследствие ее высокой теплопроводности и стойкости к коррозии. Однако из-за мягкости меди при механической чистке водяной полости от отложений солей или грязи, особенно в условиях плохой водоподготовки происходит ее истирание. В импортных конденсаторах толщина медной стенки труб аппарата составляет 0,7-0,8 мм. Для наших условий это неприемлемо. Такая стенка будет подвержена быстрому истиранию при механической чистке (ерши, порошки). Если же аппарат «запущен» и приходится высверливать солевые отложения, то можно легко нарушить герметичность труб. Поэтому в России и, в частности, в ОАО «ДоКон» в качестве исходной заготовки

для труб водяных конденсаторов используют медную трубу с толщиной стенки не менее 3 мм [1].

Для устранения выше названных проблем существует, на первый взгляд, простое решение – изготавливать трубы конденсаторов водяного охлаждения из более прочного материала – нержавеющей стали и заменить вальцовку на сварку с последующей вальцовкой, что значительно надежней [2].

Однако, при всей видимой простоте этого решения, есть две проблемы, которые, на наш взгляд, необходимо преодолеть.

Во-первых, в силу высокой жесткости нержавеющей стали, невозможно сформировать оребрение традиционным способом - накаткой роликами.

Во-вторых, оребрение должно быть более эффективным, чтобы, как минимум, компенсировать потерю тепловой эффективности из-за снижения коэффициента полезного действия ребра в силу меньшей теплопроводности нержавеющей стали, и, как максимум, чтобы уменьшить весогабаритные характеристики аппаратов.

Теплоотдача при конденсации хладона

Конденсация пара на поперечно оребренных горизонтальных трубах имеет ряд особенностей, по сравнению с конденсацией на гладких трубах, изученной достаточно хорошо теоретически и экспериментально.

В общем случае, теплообмен происходит на трех поверхностях с различными линейными размерами. Две поверхности имеют горизонтальную ориентацию – торцы ребер и впадины между ними, и одна – вертикальную ориентацию – боковая поверхность ребер. Для горизонтальных поверхностей линейными размерами L являются соответствующие диаметры D , для вертикальной поверхности – высота ребра h . Как правило, $h \ll D$. Из теории Нуссельта известно, что при ламинарном течении пленки коэффициент теплоотдачи $\alpha \sim L^{1/4}$, поэтому для каждой из указанных поверхностей коэффициенты теплоотдачи могут быть существенно разными.

Одной из особенностей конденсации пара на горизонтальных оребренных трубах является капиллярное удерживание жидкости в межреберных впадинах. В затопленной конденсатором зоне толщина пленки на 1÷2 порядка больше, чем в незатопленной и она может практически исключаться из теплообмена.

В соответствии с законом Лапласа жидкость на ребре находится под избыточным давлением по сравнению с давлением жидкости на горизонтальной поверхности. В пленке конденсата возникает градиент капиллярного давления, под действием которого жидкость стекает с вершины ребра во впадину.

На трубах, с достаточным расстоянием между ребрами, в межреберной впадине об-

разуется область, в которой конденсат под действием градиента капиллярного давления движется в направлении основания ребра. Конденсат собирается в основании, вдоль которого стекает под действием силы тяжести. Стеkanie жидкости с горизонтальных гладких труб может происходить дискретно, в виде капель и струй, стекающих на определенном расстоянии или непрерывно – в виде сплошной пленки. На режимы стекания конденсата с оребренной трубы в значительной степени влияет геометрия оребрения.

Влияние поверхностного натяжения и малый линейный размер обеспечивает высокие коэффициенты теплоотдачи на ребре. В ряде случаев это может приводить к значительному изменению температуры ребра по его высоте. Капиллярное удерживание жидкости приводит к более существенному изменению температуры по периметру оребренной трубы, чем по периметру гладкой трубы, одинаковых размеров.

Указанные факторы существенно усложняют описание гидродинамики и теплообмена при конденсации на оребренной поверхности, кроме того, это приводит к ряду трудностей методического характера при исследовании теплообмена на горизонтальных оребренных трубах.

Таким образом, процессы конденсации хладонов на оребренных поверхностях характеризуются существенно различными физическими ме-

Таблица 1. Геометрические характеристики поперечно оребренных труб

Геометрия	Sp, мм	hp, мм	Fн, м ²	Fвн, м ²	К оребр.	Fн/Fн*	Fвн/Fвн*
Оребрение							
Накатка ОАО «Докон»*, Труба Ø22x3	2,02	1,45	0,159	0,042	2,83	1,0	1,0
Метод деформирующего резания, Труба Ø18x1,5	1,21	1,21	0,175	0,048	3,09	1,1	1,12
	1,00	1,27	0,206	0,048	3,65	1,36	1,12
	0,82	1,45	0,266	0,048	4,70	1,75	1,12
	0,61	1,36	0,319	0,048	5,63	2,00	1,12

где Sp – шаг оребрения, hp – высота ребра, Fн – наружная площадь на погонном метре длины, Fвн – внутренняя площадь теплообмена на погонном метре длины, К оребр. – коэффициент оребрения, Fн/Fн* – отношении наружных площадей, Fвн/Fвн* – отношение внутренних площадей, Fн* и Fвн* – соответствующие площади поверхностей для трубы ОАО «ДоКон».



Рис.2. Нержавеющая труба, оребренная методом деформирующего резания (технология МГТУ)



Рис.3. Опытно-промышленный нержавеющий конденсатор – аналог конденсатора ККТ1-2,2

ханизмами, для воздействия на которые необходимо располагать технологией формообразования поверхности теплообмена, обеспечивающей широкое варьирование всех ее параметров.

Метод деформирующего резания

В МГТУ им. Н.Э. Баумана профессором Н.Н. Зубковым разработана новая безотходная технология производства развитых поверхностей – деформирующее резание (ДР) [3]. Получение развитого макрорельефа основано на одновременном подрезании и пластической деформации поверхностных слоев обрабатываемой детали. Разработанная технология позволяет:

- производить оребрение как мягких медных или латунных труб, а также жестких труб из сталей и титана;
- увеличить площадь поверхности после обработки до 14 раз;
- получать оребрение различ-

ной конфигурации;

- производить оребрение тонкостенных труб;
- оставлять неоребренными любые участки трубы.

Возможности технологии ДР позволяют изготавливать оребрение труб в максимально широком диапазоне: исходный диаметр 6÷30 мм, минимальная исходная толщина стенки трубной заготовки – 0,5 мм, минимальная остаточная толщина стенки – 0,2 мм, шаг оребрения 0,2÷2 мм, межреберный зазор 3÷60% от шага оребрения, высота ребер – до 5 шагов оребрения.

Как видно из приведенных данных, технология деформирующего резания позволяет охватить весь диапазон геометрий оребрения, применяемый для поверхностей, работающих в режиме конденсации.

Нами была разработана новая конструкция нержавеющего конденсатора, в котором передовая технология ДР была взята за основу при изготовлении его теплообменных элементов – оребренных нержавеющих труб (**рис.2**), основные

Таблица 2. Характеристики опытно-промышленных конденсаторов

Характеристики	Название	Материал труб	Мощность ном., кВт	Число труб	Длина труб, мм	Диаметр аппарата, мм
Образцы						
Штатный конденсатор №1	ККТ1-2,2	МЗ	12,0	19	650,0	140,0
Опытно-промышленный конденсатор №1	-	12Х18Н10Т	12,0	18	650,0	159,0
Штатный конденсатор №2	ККТ1-7,0	МЗ	40,0	68	680,0	325,0
Опытно-промышленный конденсатор №2	-	12Х18Н10Т	40,0	64	600,0	273,0

характеристики которых приводятся в **таблице 1**. Здесь же приведены характеристики типичного представителя оребрения накаткой роликами - медной трубы ОАО «Докон», применяемой в настоящее время на этом предприятии.

Выбор наиболее эффективного профиля ребра из представленного типоразмерного ряда (табл.1) был сделан на основании отдельных расчетных и экспериментальных исследований и в настоящей работе не обсуждается. Отметим только, что оребренные нержавеющие трубы, изготовленные методом ДР имеют тепловую эффективность на 25-30% выше, чем медные трубы, изготовленные методом накатки.

Опытно-промышленные конденсаторы

Для окончательного суждения об эффективности нового нержавеющего конденсатора были проведены его натурные испытания в составе промышленных холодильных установок (кондиционеров). С этой целью были спроектированы и изготовлены два опытно-промышленных конденсатора. Их

характеристики в сопоставлении с медными прототипами представлены в **таблице 2**.

Опытно-промышленные конденсаторы (**рис.3**) имели горизонтальное расположение оребренных труб, на внешних поверхностях которых конденсировался фреон. Аппараты шестизаходные по воде, заходность организована за счет оригинальных толстостенных резиновых распределителей потока, которые одновременно являлись уплотнительными элементами (**рис.4**). Оребрение нержавеющих (12Х18Н10Т) труб выполнено по технологии ДР. Трубы соединялись с нержавеющей (12Х18Н10Т) трубной решеткой с помощью аргонно-дуговой сварки и последующей вальцовки (**рис.5**). Корпус выполнен из стали 20.

Испытательный стенд

Теплотехнические испытания новых нержавеющих конденсаторов были выполнены на промышленном стенде приемо-сдаточных испытаний на холодопроизводительность автономных промышленных кондиционеров (ТУ4862-007-



Рис.4. Распределительно-уплотнительная камера



Рис.5. Нержавеющий аналог конденсатора ККТ1-7,0. Трубный пучок. Аргонно-дуговая сварка

Таблица 3. Результаты испытаний кондиционера КПА1-2,2-01.2М с конденсатором новой конструкции

Измерения по воде						
Температура на входе в конденсатор, °С	24-2	17,0	24,0	34,3	42,0	23,6
Температура на входе из конденсатора, °С	31±1,0	24,0	30,0	42,0	48,0	28,8
Измерения по хладону						
Давление кипения, кг/см ²	4,6±0,6	4,4	4,3	4,3	4,3	4,3
Температура кипения, °С	3,0±3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Давление конденсации, кг/см ²	12,8±1,6	13,2	14,5	18,9	20,5	14,0
Температура конденсации, °С	35±5	35,0	39,0	48,0	53,0	38,0
Температура воздуха на входе в кондиционер, °С						
По сухому термометру	27±2	27,7	27,1	26,7	27,7	26,7
По смоченному термометру	19,7±2	20,6	20,2	19,1	20,8	20,2
Расход воды, м ³ /час						
	не более 2,8	2,5	2,8	2,8	3,3	2,9
Гидравлическое сопротивление, кгс/см ²						
	не более 0,8	0,7	0,8	0,6	1,1	1,4
Холодопроизводительность, кВт						
	14±0,84	17,5	19,0	15,8	17,7	19,3
Потребляемая мощность, кВт						
	не более 4,75	4,4	4,7	5,5	6,1	4,7

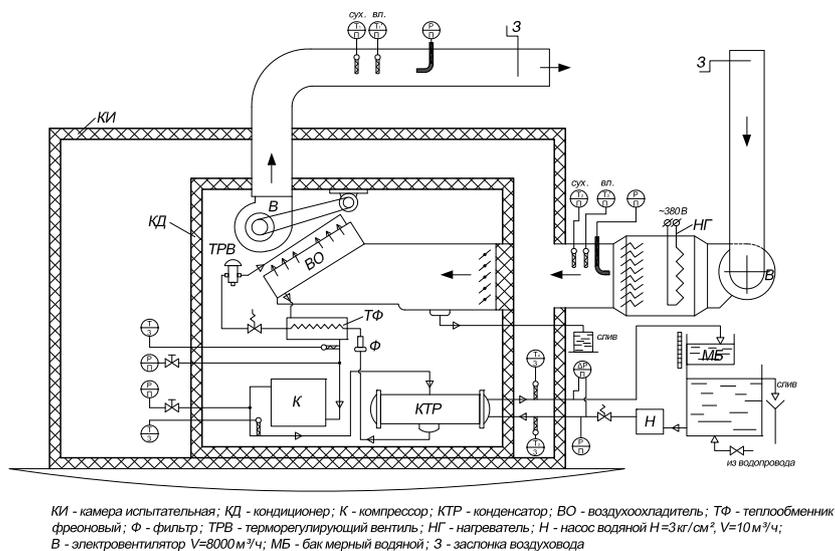


Рис.6. Стенд приемо-сдаточных испытаний на холодопроизводительность автономных промышленных кондиционеров по ТУ4862-007-00239675-2001

Рис.7. Кондиционер КПА1-2,2-01.2М с нержавеющей конденсатором



Таблица 4. Результаты испытаний кондиционера КПА1-7,0-01.М с конденсатором новой конструкции

Измерения по воде						
Температура на входе в конденсатор, °С	24-2	18,3	22,7	36,6	42,8	22,4
Температура на входе из конденсатора, °С	31±1,0	27,0	28,0	42,1	46,7	28,0
Измерения по хладону						
Давление кипения, кг/см ²	4,6±0,6	4,5	4,5	5,0	4,7	4,7
Температура кипения, °С	3,0±3,0	3,0	3,0	5,0	4,0	4,0
Давление конденсации, кг/см ²	12,8±1,6	13,0	13,0	18,0	20,0	14,0
Температура конденсации, °С	35±5	36,0	36,0	48,0	53,0	38,0
Температура воздуха на входе в кондиционер, °С						
По сухому термометру	27±2	28,0	27,4	28,0	26,6	28,0
По смоченному термометру	19,7±2	19,4	19,6	21,0	18,9	20,0
Расход воды, м ³ /час						
	не более 4,9	3,96	6,59	6,59	6,59	4,9
Гидравлическое сопротивление, кгс/см ²						
	не более 0,5	0,2	1,3	1,3	1,2	0,4
Холодопроизводительность, кВт						
	32±1,92	34,6	33,6	32,6	29,5	32,6
Потребляемая мощность, кВт						
	не более 12,35	11,5	11,5	12,1	13,8	11,8

00239675-2001). Схема стенда приведена на рис.6. Стенд позволял моделировать заданные внешние условия (температура окружающей среды, температура охлаждающей воды и т.д.) в соответствии с ТУ.

Опытно промышленные конденсаторы №1 и №2 устанавливались соответственно в кондиционеры КПА1-2,2-01.2М (рис.7) и КПА1-7,0-01.М, а кондиционеры в термостатируемую камеру стенда. Все режимные параметры измерялись эталонными приборами.

Результаты испытаний

Результаты испытаний приведены в **таблицах 3 и 4.**

Анализ результатов испытаний и освоения технологии изготовления позволяет сделать следующие заключения.

Энергетическая эффективность

Удельный расход электроэнергии на выработку холода по данным испытаний представлен в **таблице 5.** Как видно, новые нержавеющие кожухотрубные конденсаторы хладона имеют несомненное преимущество. Особенно значительная экономия электроэнергии для аппарата ККТ1-2,2 - 36%. Для аппарата ККТ1-7,0 выигрывает меньше (15%) вследствие наличия меньшего количества труб в этом аппарате и их меньшей длины.

Массо-габаритные характеристики

Переход в новых конденсаторах на меньший диаметр корпуса (соответственно с Ø159 мм на Ø140 мм и с Ø325 мм на Ø273 мм) позволил существенно уменьшить объем аппаратов (**табл.6**).

Уменьшение диаметра и количества труб, толщины трубных решеток, а также уменьшение плотности материала при переходе с меди на нержавеющую сталь позволило значительно уменьшить массу конденсаторов (**табл.6**).

Надежность эксплуатации

Замена вальцовки медных труб в стальных трубных ре-

Таблица 5. Удельный расход электроэнергии на выработку холода

Конденсатор	Штатный (ТУ)	Нержавеющий	Выигрыш
ККТ1-2,2	4,74 /14,0 = 0,34 Вт/Вт	4,7 /19,0 = 0,25 Вт/Вт	36%
ККТ1-7,0	12,35 /32,0 = 0,39 Вт/Вт	11,5 /33,6 = 0,34 Вт/Вт	15%

Таблица 6. Изменение массо-габаритных характеристик конденсаторов при замене меди на нержавеющую сталь

Конденсатор	Уменьшение габаритов	Уменьшение массы
ККТ1-2,2	13,5%	19,0%
ККТ1-7,0	19,0%	28,0%

шетках на аргонно-дуговую сварку и вальцовку нержавеющих труб в нержавеющих трубных решетках конденсаторов повышает их надежность и обеспечивает:

- защиту от сейсмических нагрузок и вибрации, приводящей к постепенному ослаблению вальцованного соединения;
- устойчивость соединений труб с трубными решетками к переменным температурным нагрузкам (термоциклированию);
- значительно меньшую коррозию охлаждающих труб и трубных решеток;
- значительно меньшую эрозию входных участков труб по ходу воды;
- независимость плотности соединения труб с трубными решетками от допускового отклонения внутреннего и наружного диаметров вальцуемых труб и диаметра отверстий в трубных решетках;
- независимость плотности соединения труб с трубными решетками от износа инструмента.

Нержавеющие кожухотрубные конденсаторы были допущены к поставке ОАО «До-

Кон» на производственные объекты и прошли успешные долгосрочные испытания в течение пяти лет в составе автономных промышленных кондиционеров.

Выводы

Разработаны и испытаны новые нержавеющие кожухотрубные конденсаторы водяного охлаждения. Полученные теплотехнические данные при испытании опытно-промышленных конденсаторов, технология их изготовления и долгосрочные успешные испытания свидетельствуют о высокой эффективности и надежности

этих аппаратов. Использование их с полным основанием может быть рекомендовано при создании российского холодильного оборудования для нужд атомной энергетики, обороны и космоса.

Литература

1. ОАО «ДоКон». Каталог оборудования, 2007.
2. Пермяков В.А., Левин Е.С., Дивова Г.В. Теплообменники вязких жидкостей, применяемых на электростанциях, Энергоатомиздат, Л., 1983.
3. Зубков Н.Н. Оребрение труб теплообменных аппаратов подрезанием и отгибом поверхностных слоев, Новости теплоснабжения, №4, 2005.

По вопросу изготовления нержавеющих водяных конденсаторов обращайтесь:

143900, г. Балашиха М.О., ул. Пушкинская, д.7, стр.1, ИП Ельчинов В.П.

www.aparatel.ru, elchinov@mail.ru

тел.: (495)974-26-65, 521-57-96

142000, г. Домодедово М.О., Каширское шоссе, д.14, ОАО «ДоКон»

www.docon.ru, mail@docon.ru

тел.: (495)996-21-23, 980-82-00