

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотонос

ЗМЕЕВИКОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ
Моделирование, расчет

Монография

Казань
2016

УДК 536.2; 662.987

ББК 31.31

Б14

Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д.

Б14 Змеевиковые теплообменники. Моделирование, расчет: Монография / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.- строит. ун-та, 2016. – 245 с.

ISBN 978-5-7829-0502-6

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

В монографии представлены высокотехнологичные методы сварки, применяемые в производстве теплообменного оборудования, в том числе и лазерная сварка – в технологии пружинно-витых каналов. На базе таких труб рассмотрены конструкции инновационных змеевиковых теплообменных аппаратов и приведены методики их расчета.

Книга предназначена для инженеров, студентов и аспирантов, а также инженерно-технических работников, занимающихся проблемами разработки, проектирования и исследования современного теплоэнергетического оборудования.

Табл. 3; ил. 89; библиогр. 187 наименов.

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой ОПП ФГБОУ ВПО
«Казанский национальный исследовательский технологический
университет»,
А.Н. Николаев

Доктор технических наук, профессор кафедры ТГВ ФБГОУ ВПО
«Казанский государственный архитектурно-строительный университет»
Р.Г. Сафиуллин

УДК 536.2; 662.987
ББК 31.31

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2016

© Багоутдинова А.Г.,
Золотоносов Я.Д., 2016

ISBN 978-5-7829-0502-6

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые процессы, протекающие в разнообразных теплообменных аппаратах, с успехом реализуются в современных технологиях, в том числе химической, пищевой, нефтеперерабатывающей промышленности, а также в энергетике, ЖКХ и смежных с ними отраслях.

Материалы, используемые для изготовления теплообменного оборудования, – низколегированные и высоколегированные стали, а также цветные металлы и их сплавы.

По способу подачи тепла между обменивающимися теплом средами, теплообменники делятся на два вида [1]: теплообменники смешения, в которых тепло передается от одной среды к другой при их непосредственном соприкосновении и поверхностные теплообменники, в которых перенос тепла между обменивающимися теплом средами происходит через разделяющую их поверхность теплообмена – глухую стенку. Теплообменники первого вида представляют собой аппараты башенного типа с неподвижными внутренними устройствами (хордовыми насадками или полками) [1]. Теплообменники второго вида разнообразны по конструкции, и их можно разделить на следующие группы: кожухотрубчатые, типа «труба в трубе», змеевиковые и другие [1–3].

Основными требованиями, предъявляемыми к теплообменному оборудованию при изготовлении и последующей эксплуатации, являются [2–5]:

- сокращение расхода материалов в процессе производства аппаратов;
- высокая коррозионная стойкость применяемых материалов;
- небольшие массогабаритные показатели теплообменного аппарата при достаточной площади поверхности теплообмена;
- высокий коэффициент теплопередачи при минимальном

гидравлическом сопротивлении;

- надежность и герметичность оборудования;
- легкий доступ к теплообменной поверхности оборудования для ее очистки от загрязнений;
- снижение скорости солеотложения;
- унификация деталей и узлов теплообменного оборудования.

Производство любого типа теплообменных аппаратов не обходится без сварочных работ. При изготовлении теплообменного аппарата кожухотрубчатого типа – это приварка труб к трубной доске, сварка корпуса, при изготовлении пластинчатых теплообменников – сварка теплообменной кассеты. От качества выполнения сварных швов зависит качество теплообменного оборудования, его надежность и долговечность.

В настоящее время с помощью сварки соединяют детали толщиной от нескольких микрон до нескольких десятков сантиметров, изготовленных из конструкционных сталей, разнородных и трудно-свариваемых специальных сталей и сплавов, а также из композиционных материалов [6–15]. Все это стало возможным благодаря развитию сварочных технологий и различных методов сварки, число которых продолжает увеличиваться до настоящего времени и насчитывает на сегодняшний день более 160 способов [6].

Развитие современного производства обуславливает и внедрение наукоемких технологий, в том числе лазерной сварки, и обработки на ее основе различных материалов, которые определяют современный уровень производства промышленно развитых стран. Использование лазерной сварки и обработки материалов (наплавка, упрочнение, закалка и т.д.) позволяет обеспечить высокое качество производимой продукции, заданную производительность, экологическую чистоту, а также экономию людских и материальных ресурсов [11–15].

Глава первая

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ

Сварка – технологический процесс получения неразъемного соединения твердых материалов в результате действия межатомных сил, которое происходит при местном сплавлении или совместном пластическом деформировании свариваемых частей. Сваркой получают изделия из металла и неметаллических материалов (стекла, керамики, пластмасс и др.) [18].

При сварке используются различные источники энергии: электрический ток, электрическая дуга, газовое пламя, лазерное излучение, электронный луч, трение, ультразвук.

Развитие технологий позволяет осуществлять сварку не только в условиях промышленных предприятий, но и под водой, и в космосе [19].

1.1. Сварка в древности и средние века

Первые методы сварки появились у истоков цивилизации – с началом применения и обработки металлов.

Известны древние образцы сварки, выполненные в VIII–VII тысячелетиях до нашей эры. Источниками металла на тот момент были случайно найденные куски самородных металлов – золота, меди, железа. При помощиковки части металла соединяли между собой и превращали в простейшие изделия необходимой формы.

С освоением литейного производства появилась литейная сварка, при которой соединяемым деталям придавалась необходимая форма, а место сварки заливалось расплавленным металлом.

Особое место в производстве металлических изделий, для улучшения качества лезвия режущих и рубящих орудий, занимала сварка металлов с различными свойствами.

Изготовление копий, дротиков, серпов, ножей и прочее осуществлялось путем сварки двух полос железа с промежуточной вставкой из стали с выходом последней на режущую часть лезвия. Это давало хорошее сочетание мягкого и вязкого железа с твердой, но хрупкой сталью, содержащей большое количество углерода [20].

Примером такого изделия является нож из городища скифской эпохи, изготовленного сваркой полосы низкоуглеродистой стали (0,1–0,2% С) с высокоуглеродистой сталью (0,6–0,7% С) [21].

Так же при изготовлении ножей, серпов и топоров кузнецы часто производили наварку небольшой стальной пластины на режущую часть лезвия.

К числу таких изделий относится нож из Бельского городища скифской эпохи, у которого на основу из низкоуглеродистой стали, практически железа (0,1–0,15% С), наварена пластина из стали (0,4–0,5% С) [22].

При изготовлении ювелирных изделий из золота серебра и бронзы в раннем железном веке широко использовали пайку. В случае необходимости произвести неразъемное соединение деталей из бронзы, серебра или золота применяли пайку с использованием легкоплавкого свинцово-оловянистого припоя. Между частями, которые необходимо соединить в единое целое, закладывали кусочки сплава – припоя, и собранное таким образом изделие нагревали до температуры, достаточной для расплавления припоя, но ниже основного металла [23].

Начиная с железного века и до XIX столетия, основным и широко освоенным технологическим методом при изготовлении всевозможных железных и стальных изделий, была кузнечная сварка.

Кузнечная сварка заключается в нагреве изделий из металла до «сварочного жара» в кузнечных горнах с последующей их проковкой [24].

Процесс кузнечной сварки представлен на рис. 1.



Рис. 1. Процесс кузнечной сварки

Кузнечная сварка позволяла получать соединения из тончайших полосок железа (от 0,8 до 2 мм), например при изготовлении замочных пружин, кольчуг и других изделий, высококачественных режущих и рубящих частей орудий и оружия [22; 25].

В древности была распространена кузнечная сварка двух типов:

- сварка лезвия из трех полос, из которых стальная полоса находилась внутри, а две железные – снаружи; так изготавливали серпы, ножи, косы, токарные резцы, мечи, копья;

- наварка на железную основу стального лезвия; это наиболее распространенный прием, при помощи которого делали ножи, ножницы, серпы, косы, гарпуны, топоры, тесла, скобели, сверла, резцы, мечи, копья, кресала, бритвы и прочее.

Одной из разновидностей кузнечной сварки является способ, основанный на соединении нескольких полос металла различного химического состава, которые сваривали, скручивали, создавая своеобразный рисунок.

С применением этой технологии делали некоторые ножи и мечи [22].

В XIX в. кузнечная сварка была механизирована – ручной труд молотобойца заменялся работой машин – механическими молотами с весом бойка до 1 тонны, производящими от 100 до 400 ударов в минуту. Стыки более крупных деталей обжимались на мощных гидравлических прессах. Существенно усовершенствовались конструкции печей для нагрева свариваемых деталей, заменивших первоначальные примитивные горны. Печи перешли на твердое, жидкое и газообразное топливо.

Методом кузнечной сварки получали материал, состоящий из двух или более различных металлических слоев металлов или их сплавов. Листы разнородных металлов собирали в пакет, который нагревали в печах и пропускали через валки прокатного стана.

Широкое применение кузнечная сварка находила в производстве сварных стальных труб с прямолинейным продольным швом; кромки шва предварительно скашивали, заготовку нагревали в печи, а шов прокатывали на сердечнике (оправке).

Таким образом, кузнечная сварка и пайка были ведущими процессами сварочной техники вплоть до конца XIX в., когда начался совершенно новый этап развития сварки [20].

Несмотря на широкое распространение кузнечной сварки, она имела существенный недостаток – невозможность получения качественного сварного соединения большинства углеродистых и легированных сталей.

По мере роста добычи и обработки металла, а также производства разнообразных изделий из него, многократно увеличилась потребность в сварочных работах, которую не могли удовлетворить существовавшие на тот момент способы сварки. Началось стремительное развитие сварочной техники – за десятилетие она совершенствовалась больше, чем за столетие предшествующего периода. Быстро развивались и новые источники

нагрева: электрический ток и газокислородное пламя, легко расплавлявшие железо.

В развитии сварки произошел прорыв в конце XIX в. на основе достижений в области физики и электротехники. За короткий срок были разработаны и внедрены в производство ряд новых способов сварки, являющихся основой сварочного производства и в наше время. Источником нагрева для самого распространенного до настоящего времени вида сварки служит электрическая дуга.

Предпосылкой к появлению принципиально новых способов соединения металлов явилось открытие в 1802 г. Василием Владимировичем Петровым дугового разряда [18], практическое применение которого стало возможным благодаря работам итальянского физика Алессандро Вольта (1745–1827 г.), обнаружившего появление электрического тока между разнородными металлами (медь+цинк, серебро+цинк), помещенных в водный раствор электролита [26].

В 1800 г. В.В. Петров в Петербурге изготовил «вольтовые столбы» разного размера, а через два года он создал крупнейший в мире «вольтов столб» из 2100 пар металлических элементов. Схема электрической батареи, построенная В.В. Петровым, показана на рис. 2. В свое время эта батарея была наиболее мощным источником электрического тока [22].

В 1802 г. В.В. Петров, исследуя явление электропроводности различных материалов, обнаружил яркое свечение между угольными электродами, включенными в цепь батареи, он также отметил, что дуговой разряд, являясь источником чрезвычайно яркого света, пригоден для освещения. Кроме того, было установлено, что дуговой разряд имеет довольно высокую температуру, благодаря чему нагревает, расплавляет и обращает в пары металлы, которые в форме полосок и проволочек были введены в пламя дугового разряда.

Таким образом, наметились возможности практического применения дугового разряда для освещения и плавления металлов [23].

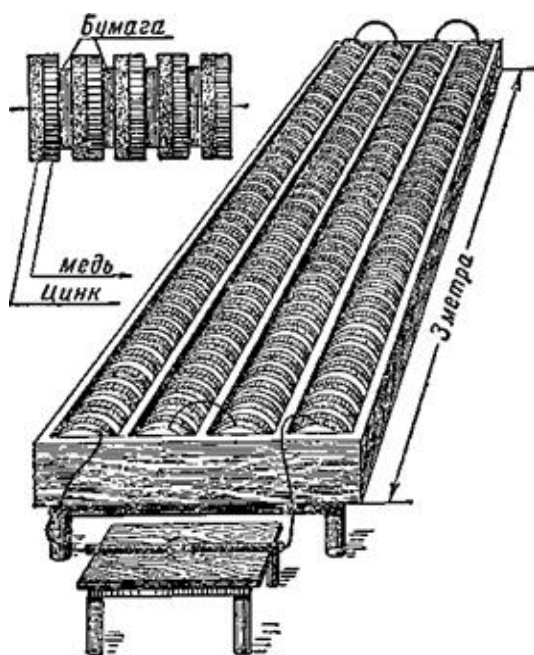


Рис. 2. Электрическая батарея, построенная В.В. Петровым

Однако широкое применение дугового разряда для сварки было невозможным из-за отсутствия на то время необходимой техники для питания дуги, а именно источников тока и соответствующей электрической аппаратуры: выключатели, регуляторы, измерительные приборы, электрические провода, кабели и прочее.

От открытия В.В. Петровым дугового разряда до изобретения Н.Н. Бенардосом дуговой сварки прошло около 80 лет.

За это время английский физик Майкл Фарадей открыл явление электромагнитной индукции.

В 1821 г. он сконструировал устройство, которое назвал «ротатором». В каплю ртути вертикально вставлялся магнит, рядом вертикально навешивался провод. Когда по проводу пропускали ток, он начинал вращаться вокруг капли с магнитом, позднее им было создано устройство, в котором магнит вращался вокруг провода.

Это были прообразы электромоторов, изобретенные почти 50 лет спустя [27].

В начале 30-х гг. XIX в. М. Фарадей обнаружил ток в цилиндрической катушке, когда в нее вставлял и вынимал постоянный магнит.

Продолжая свои опыты, Фарадей построил первый электрический трансформатор и электрогенератор, ставшие в последующем основой для создания электрического оборудования – источника сварочного тока [28].

Впервые попытку сварить металлы электрическим током предпринял американский инженер Э. Томсон в 1867 г. Он пропускал ток большой силы, но малого напряжения, через два плотно прижатых куска металла, в результате чего кромки кусков плавилась. В момент плавления Томсон сжимал куски и проковывал их молотом. Температура понижалась, так как резко падало сопротивление тока, и металл быстро остывал.

Этот способ сварки широко не применялся на практике, так как свариваемые части сильно деформировались

В 1868 г. немецкий инженер Г. Цернер впервые применил для сварки угольный электрод. Заготовки он располагал горизонтально, после чего подводил к ним угольные электроды – по два с каждой стороны. Затем через всю систему пропусклся электрический ток, в результате чего металл сильно раскалялся. Образовавшаяся электрическая дуга нагревала свариваемые предметы «до белого каления». Далее, как и в методе Томсона, ток выключали, а свариваемые детали сжимали и проковывали.

Первым электрическую дуговую сварку осуществил русский изобретатель Н.Н. Бенардос. Он же является и создателем всех основных видов электрической дуговой сварки. Н.Н. Бенардос впервые в мире выдвинул идею, а затем разработал устройство для сварки металлическим электродом на переменном токе, разработал сварку в струе газа, магнитное управление дугой, сварку наклонным электродом. Он первым в своих работах стал применять различные флюсы и закрытую дугу, и, наконец, он является основоположником механизации и автоматизации сварочного процесса.

В 1882 г. Н.Н. Бенардос на практике применил способ электро-сварки – «способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока», названный им «электрогефест».

При его разработке Н. Н. Бенардос ставил перед собой две задачи.

1. Как воспользоваться высокой температурой вольтовой дуги для плавления металлов?

2. Возможно ли приспособить существующее электрооборудование для сварочных аппаратов?

Для решения этих задач Н.Н. Бенардос конструирует батарею особых аккумуляторов, разделявшихся на группы. В зависимости от силы тока, необходимого для сварки, группы аккумуляторов можно было подключать последовательно или параллельно.

Сами аккумуляторы были собраны из пластин, число которых легко регулировалось, что делало их устойчивыми к сильным разрядам тока [29].

Сущность сварки, предложенной Н.Н. Бенардосом (рис. 3), заключалась в образовании дуги в результате приближения электрода к обрабатываемой поверхности. При этом угольный электрод мог служить как положительным, так и отрицательным полюсом, а другим полюсом служило свариваемое изделие.

Согласно предложенному Н.Н. Бенардосом способу, дуга 3 расплавляет основной металл 1. Если требуется пополнить ванну расплавленного металла, в дугу вводится конец прутка присадочного материала 4. При данном способе обычно применяется постоянный ток. Угольный электрод 2 присоединяется к отрицательному полюсу, а металл – к положительному. Этим способом осуществлялось соединение элементов изделия между собой, резка металлов, производство отверстий и полостей, а также наплавка металла слоями [30].

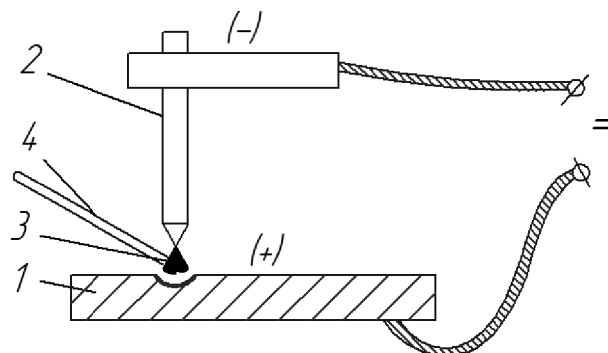


Рис. 3. Схема дуговой электросварки по Н.Н. Бенардосу

Первое оборудование для дуговой сварки состояло из паровой машины мощностью 20–23 л.с., приводящей в действие электрический генератор, параллельно генератору была подключена батарея, состоявшая из 200 аккумуляторов собственной конструкции. Аккумуляторы расположены были в четыре параллельных ряда и выполняли роль буфера, принимая на себя толчки, вызываемые резкими изменениями тока [29].

Угольные электроды, разработанные Бенардосом (рис. 4), были как сплошные, так и полые с помещенным внутрь металлическим стержнем и измельченной шихты в качестве флюса (кварца, буры, нашатыря и др.). В некоторых случаях Н.Н. Бенардос применял угольные электроды в виде конуса или круга.

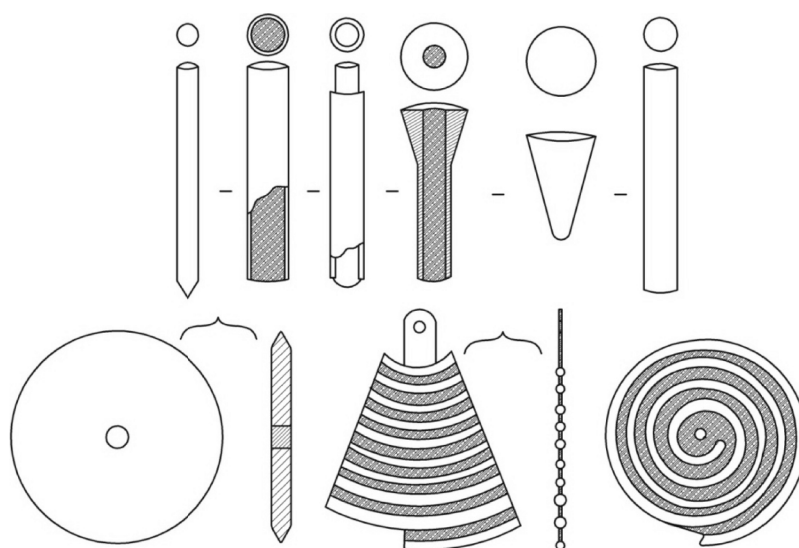


Рис. 4. Угольные и металлические электроды, разработанные Н.Н. Бенардосом

Для закрепления электродов и поддержания дуги Бенардос придумал и разработал различные устройства, названные им электропаяльниками. На рис. 5 приведены примеры держателей электрода для дуговой сварки, предложенные Н.Н. Бенардосом. Его простейший тип электрододержателя для угольного электрода сохранил свой вид до наших дней.

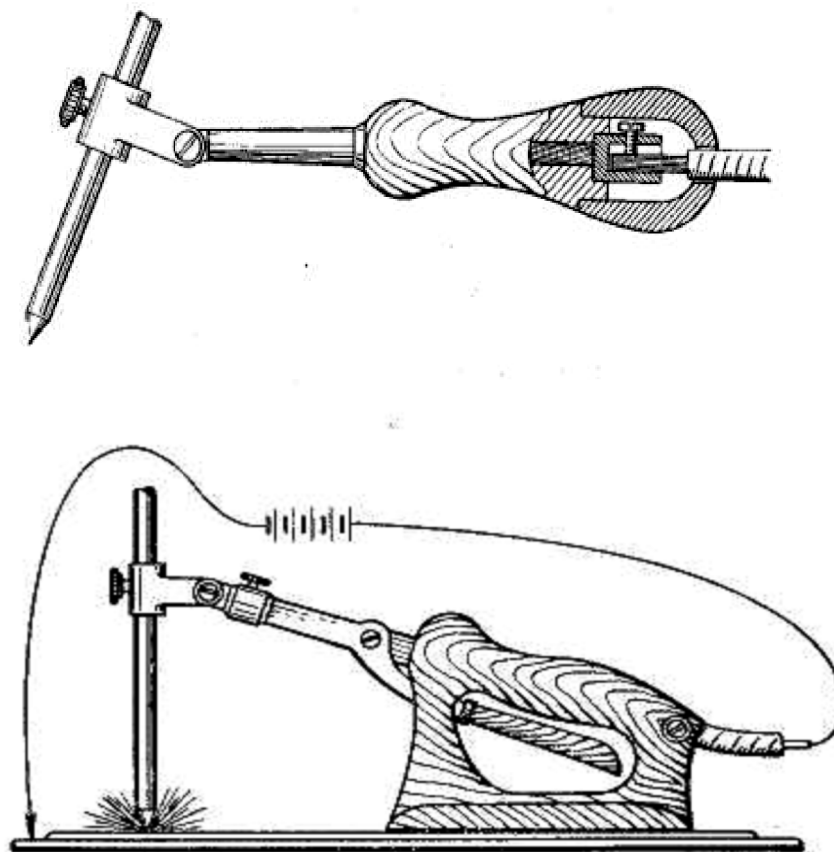


Рис. 5. Держатели электрода для дуговой сварки, предложенные Н.Н. Бенардосом

Стремясь увеличить площадь нагрева и создать защитную среду в зоне сварки, Бенардос применил сварку в среде защитного газа. «Работа дугой совместно с газами, – писал он, – служит для увеличения поля нагрева и раскаления поверхностей обрабатываемых металлов».

В настоящее время сварка в среде различных газов – аргона, азота – применяется во многих отраслях техники.

Стремясь автоматизировать процесс, Бенардос впервые разработал несколько систем автоматизированных устройств для сварки как металлическим, так и угольным электродами. На рис. 6 показана установка Н.Н. Бенардоса для дуговой сварки с автоматическим регулированием дуги.

Эти устройства явились прототипами современных сварочных автоматов. Одно из них было приспособлено для сварки продольных швов металлическим электродом. В этой конструкции металлический электрод монтировался неподвижно на удерживающей его тележке. По мере его плавления электрод продвигался тележкой с прикрепленным к ней автоматическим регулятором тока и длины дуги.

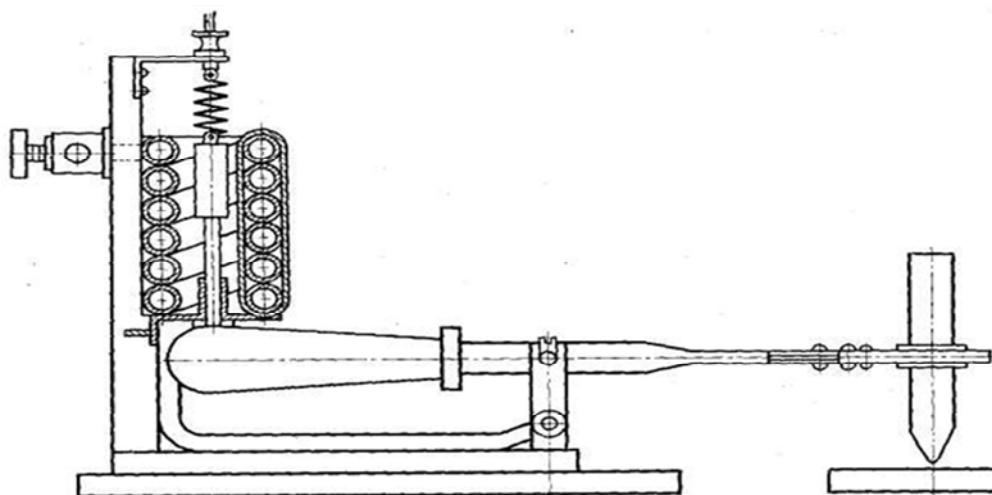


Рис. 6. Установка Н. Н. Бенардоса для дуговой сварки с автоматическим регулированием дуги

Особое устройство предназначалось для сварки продольных швов листов и труб большого диаметра (рис. 7). На этом станке швы сваривались угольным электродом, при этом дуга регулировалась автоматически. Обработываемое изделие устанавливалось неподвижно, а устройство, в котором закреплен электрод, перемещалось вдоль шва вперед и назад, а затем двигались валки для прокатки шва.

Приемы, которыми пользовался Бенардос при работе металлическим электродом и устройства, разработанные им, свидетельствуют о том, что идеи, заложенные изобретателем электрической дуговой сварки, сохранили свое значение до наших дней [29].

Почти одновременно с Н.Н. Бенардосом работал Н.Г. Славянов, много сделавший для развития дуговой сварки.

Обладая глубокими знаниями металлургии и электротехники, Н.Г. Славянов разработал способ дуговой сварки металлическим плавящимся электродом с защитой сварочной зоны слоем порошкообразного флюса и предположил механизм для полуавтоматической подачи электродного прутка в зону сварки. Новаторской была и идея исключить из сварочной цепи аккумуляторную батарею, оставив в качестве источника питания только генератор (1888 г.) [31–33].

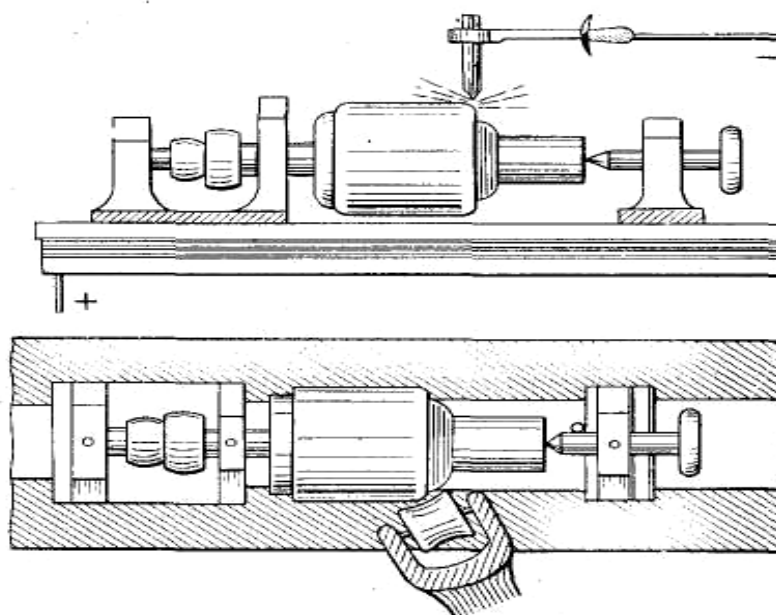


Рис. 7. Устройство для сварки продольных швов листов, труб и цилиндров большого диаметра

Способ получил название «дуговая сварка по способу Славянова». Схема дуговой электросварки, предложенная Н.Г. Славяновым, представлена на рис. 8.

Под ним подразумевают сварку плавящимся металлическим электродом. Способ отличался значительной сложностью подготовки и выполнения, требовал высокого искусства от сварщика и мало походил на обычный в наши дни способ ручной сварки плавящимся электродом. Ввиду значительных размеров ванны, сварка выполнялась только в нижнем положении.

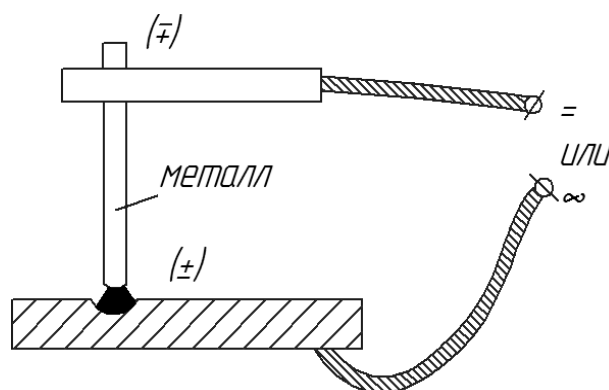


Рис. 8. Схема дуговой электросварки по Н.Г. Славянову

При сварке по способу Славянова дуга плавит одновременно металл изделия, электрод и сварочный флюс, образуя общую сварочную ванну из жидкого металла, покрытого шлаком. Коэффициент полезного использования тепла дуги при этом значительно возрастает.

Перед сваркой изделие подогревалось для предупреждения слишком быстрого охлаждения сварочной ванны, а по окончании покрывалось теплоизолирующими материалами, тем самым замедляя охлаждение изделия, делая его равномерным.

Для удержания жидкого металла, ваннам значительного объема придавали форму, ограждая их угольными или графитными пластинами.

Для улучшения качества сварки были применены раскислители (ферросилиций и ферроалюминий) и легирующие присадки, в первую очередь ферромарганец, вводимый в сварочную ванну. Раскислители и легирующие присадки были разработаны также для меди и бронзы.

Известность Славянова и изобретенного им способа быстро возрастала. Помимо патента в России, Славянов получил патенты во Франции, Германии, Италии, Австро-Венгрии, Бельгии, США, Швеции.

В 1892 г. он был награжден золотой медалью Русского технического общества на IV электротехнической выставке в Петербурге. В 1893 г. получил диплом и большую золотую медаль на Всемирной электротехнической выставке в Чикаго (США) [22; 31].

В начальный период дуговую сварку применяли для ремонта простых изделий, обычно наплавляли изношенные поверхности и заваривали трещины. Дальнейшее усовершенствование технологии сварки позволило применять ее для более ответственных работ. С помощью сварки ремонтировали паровозные цилиндры, рамы, изготовленные из проката, вагонные колеса. Заваривали трещины в бронзовых золотниках и в перемычках между отверстиями дымогарных решеток, наплавляли шейки паровозных и вагонных осей [30].

По способу Славянова успешно сваривали чугун и бронзу, стальные детали значительного сечения и ремонтировали различные изделия [22].

Н.Г. Славянов не только изобрел дуговую сварку металлическим электродом, описал ее в своих статьях, книгах и запатентовал в различных странах мира, но и сам широко внедрял ее в практику. Он создал первый сварочный генератор и автоматический регулятор длины сварочной дуги, разработал флюсы для повышения качества наплавленного металла при сварке.

Созданные Н.Н. Бенардосом и Н.Г. Славяновым способы сварки явились основой современных методов электрической сварки металлов.

Однако в условиях царской России их изобретения не нашли большого применения. Только после Великой Октябрьской социалистической революции сварка получает распространение в России.

1.2. Развитие сварки за период XIX и начала XX веков

В конце XIX – начале XX вв. были предприняты первые попытки применения для резки и сварки металлов горючих газов и их смесей с кислородом.

Созданию газовой сварки и резки способствовали исследования процессов горения газовых смесей французским ученым А.Л. Ле Шателье. В 1895 г. он доложил французской академии наук о получении им высокотемпературного пламени (свыше 3000°С) при сжигании ацетилена и кислорода (ацетилен был открыт в 1836 г., а в 1863 г. ацетилен был синтезирован М. Бертло).

Первую ацетилено-кислородную сварочную горелку сконструировали также французские инженеры Э. Фуше и Ш. Пикар, которые получили в 1903 г. в Германии на нее патент. Предложенные ими конструкции газосварочных горелок принципиально почти не изменились до настоящего времени [31].

В России газовая сварка стала известна в 1906 г., когда она впервые демонстрировалась в Московском техническом училище, после чего, ввиду ее портативности и невысокой стоимости аппаратуры, интенсивно началось ее промышленное освоение, что привело к временному снижению интереса к электродуговой сварке. Однако, небольшие объемы производства кислорода, карбида кальция и газосварочной аппаратуры, существенно тормозили применение газовой сварки и резки металлов в России.

В начале XX в. газовая сварка и резка в России использовалась в небольших мастерских при ремонте изделий из низкоуглеродистой стали, меди и чугуна, исправлении брака литья и сварки некоторых неответственных изделий, при этом использовалась аппаратура и материалы, ввозимые из-за границы [22; 23; 34].

В 1911 г. Комиссия при Министерстве торговли и промышленности допустила газовую сварку для изготовления паровых котлов, разрешив сварку некоторых неотчетственных частей котла.

Более интенсивное развитие газовая сварка в России получила в период первой мировой войны. В это время Петроградский технологический институт организовал особую школу «свинцово-паяльного дела и автогенной сварки». Профессор института В.Я. Курбатов написал для этой школы специальную книгу «Самосварка и различные способы спаивания металлов» (1918 г.), которая содержала необходимые практические и технические указания. Начиная с этого времени и вплоть до 30-х гг. XX в., газовая сварка занимает ведущее положение в сварочном производстве СССР и России.

Хотя газовая сварка и получила мощный толчок в начале XX в., дуговая сварка была уже известна во многих странах мира, где получила свое дальнейшее развитие.

Так в 1902 г. шведский инженер О. Кельберг изобрел технологию сварки электродами, покрытыми клево-силикатным материалом, что стабилизировало горение электрической дуги, и защищала зону дуговой сварки от атмосферного воздуха. В 1904 г. О. Кельберг основал в Гётеборге фирму «ESAB». В 1906 г. им был получен патент «Процесс электрической сварки и электроды для этих целей». Именно использование покрытых плавящихся электродов дало повод к развитию и использованию сварочных технологий в различных отраслях производства [22].

В 1911 г. англичанин А. Строменгер существенно улучшил электродное покрытие. Предложенное им покрытие состояло из асбестового шнура, пропитанного силикатом натрия. Этот шнур наматывался на металлический стержень. Поверх этого покрытия наматывалась тонкая алюминиевая проволока.

Такая структура электродного покрытия, за счет образования шлака, при сварке обеспечивала защиту сварочной ванны и металла сварного шва от атмосферного воздуха. Алюминий использовался в качестве раскислителя и обеспечивал удаление кислорода. Под названием «Квази-арк» эти электроды распространились по Европе и Америке.

В 1917 г. С. Джонсу был выдан британский патент на метод получения электрода, покрытие которого наносилось методом опрессовки. Металлический стержень проталкивался через фильеру одновременно с шихтой, ложившейся на стержень.

В этом же году О. Андрус и Д. Стреса разработали новый тип покрытия электродов. Стальной стержень был обернут бумагой, приклеенной силикатом натрия. В процессе сварки такое покрытие выделяло дым, защищая сварочную ванну от воздействия воздуха. Также было отмечено, что бумажное покрытие обеспечивало моментальное зажигание электрической дуги с первого касания и стабилизировало ее горение.

В 1925 г. англичанин А.О. Смит использовал для улучшения качества электродного покрытия порошкообразные защитные и легирующие добавки. В то же время французские изобретатели О. Саразен и О. Монейрон разработали покрытие электродов, в составе которого были использованы соединения щелочных и щелочноземельных металлов: полевой шпат, мел, мрамор, сода. Благодаря низкому потенциалу ионизации таких элементов, как натрий, калий, кальций, обеспечивалось легкое возбуждение дуги и поддержание ее горения [32].

Таким образом, за первую четверть XX в. были разработаны конструкции плавящихся электродов для ручной дуговой сварки, методы их изготовления, обоснован состав электродных покрытий. Они содержали специальные компоненты: газообразующие – оттесняющие воздух из зоны

сварки; легирующие – улучшающие состав и структуру металла шва; шлакообразующие – защищающие расплавленный и кристаллизующийся металл от взаимодействия с газовой фазой; стабилизирующие – вещества с низким потенциалом ионизации.

Дальнейшие разработки в области производства сварочных электродов были сконцентрированы на компонентах, входящих в состав покрытия и электродной проволоки и промышленных методах их производства.

В этот же период времени были проведены работы по усовершенствованию конструкции источников питания для сварки.

Сварочный генератор предложенный и построенный Славяновым, несколько упростил уход за источником питания. Однако для сглаживания пиков тока в цепи оставалась аккумуляторная батарея, т.е. конструкция генераторов была еще не совершенна.

В 1907 г. на заводе «Линкольн электрик» в Америке был выпущен первый генератор с регулируемым напряжением.

В 1909 г. свой генератор постоянного тока создал американский промышленник и изобретатель Вестингауз.

В это же время начинает выпускать мотор-генераторы фирма «Дженерал электрик», возглавляемая Коффином.

Электрическая промышленность разных стран уже осваивала переменный ток. Его применение сулило большие преимущества, и в первую очередь, упрощение источников энергии – сварочных трансформаторов, так как в них не было сложных вращающихся деталей, работали они бесшумно, были просты в обслуживании [32].

1.3. Становление и развитие сварочного производства в СССР

В 20-е гг. продолжалось активное внедрение дуговой сварки в промышленность. Так под руководством В.П. Вологодина, являвшимся представителем Морского ведомства и директором управления Дальневосточного судоремонтного завода во Владивостоке, был создан первый сварочный аппарат, успешно примененный на «Дальзаводе» в 1920 г. Первоначально сварка на заводе использовалась для ремонта судов, а позже в технологии изготовления сварных судов и ряда ответственных изделий и конструкций.

В 1921 г. под руководством В.П. Вологодина был изготовлен сварочный котел водяного отопления, а в 1922 г. – серия первых сварных паровых котлов. Одной из первых крупных работ по сварке сложных металлоконструкций, выполненных под руководством В.П. Вологодина, было восстановление в 1924 г. железнодорожного моста через реку Амур под Хабаровском [22].

В 1928 г. советский ученый Д.А. Дульчевский изобрел автоматическую сварку под флюсом. Кроме того им было разработано оборудование для автоматической сварки, среди которого прибор для автоматического регулирования длины дуги и подачи электрода при дуговой электросварке, аппарат для электрической дуговой сварки.

Автоматическая дуговая сварка под флюсом – сварка электрической дугой, горящей между концом сварочной проволоки и свариваемым металлом под слоем флюса [35].

В 1939–1940 гг. коллективом Института электросварки под руководством и при непосредственном участии Е.О. Патона на основе идей, выдвинутых еще Н.Г. Славяновым, был разработан отечественный способ механизированной сварки, получивший тогда название «скоростная автоматическая сварка голым электродом под слоем флюса».

Впервые этот способ соединения металлов был продемонстрирован в лаборатории Института электросварки в июле 1940 г. Был сварен стыковой шов металла толщиной 13 мм за один проход скоростью 32 м/ч, что во много раз превышало скорость ручной сварки [32].

Внедрение автоматической сварки в производство началось с 1940 г. Непрерывная сварка электродом под флюсовым покрытием осуществлялась при помощи сварочной головки с автоматической подачей прутка. Этот процесс механизированной сварки известен как гравитационная сварка. С начала 1940-х гг. этот метод широко использовался на японских верфях для сварки протяженных горизонтально-вертикальных угловых швов [36].

Преимущество данного процесса заключается в том, что для достижения глубокого провара и получения высокой скорости наплавки металла при значительной экономии затрат, можно применять очень высокие сварочные токи. Шов сваривают без разбрызгивания металла и попадания воздуха, так как дуга и сварочная ванна полностью защищены толстым слоем флюса [37].

При сварке закрытой дугой были механизированы практически все сварочные операции: возбуждение дуги, поддержание заданного режима горения и перемещения дуги вдоль кромок, заварка кратера при окончании процесса, подача проволоки в зону сварки и перемещение аппарата или изделия в соответствующем направлении [32].

Создание данного способа сварки потребовало разработки оборудования принципиально нового типа. Были разработаны и созданы механизмы для подачи флюса в зону сварки, удержания его на месте сварки, сбора неиспользованного флюса для его повторного использования.

Кроме специальных источников питания, обладающих требуемыми сварочно-технологическими характеристиками, можно выделить аппараты для сварки: сварочные трактора и самоходные головки, которые обеспечивали возбуждение дуги в начале процесса, поддержание ее горения во время сварки и заварку кратера в конце шва [22].

Технологии дуговой и газовой сварки, самостоятельно развивающиеся в первом и во втором десятилетиях XX в., не могли не объединиться в едином процессе – в способе газoeлектрической сварки. Следует отметить, что применение при дуговой сварке в качестве дополнительного источника теплоты горючего газа было предложено еще Н.Н. Бенардосом. Он разработал первый электрододержатель с соплами для подачи газа в зону горения дуги. Однако эта технология не была доведена до практического внедрения и не расширила диапазон применения дуговой сварки

В создание практически пригодных технологий, получивших название газoeлектрической сварки, основной вклад внес А. Александер.

Чтобы защитить расплавленный металл от атмосферного воздуха, А. Александер в 1920 г. предложил вводить в зону сварки пары метанола. При этом плавящийся электрод подавался через трубку, служащую также и соплом для выхода метанола из специального газогенератора. Вблизи дуги метанол при 70°C полностью распадается на водород и оксид углерода и образует смесь, обладающую хорошими восстановительными свойствами. Для практического применения этого процесса дополнительно к сварочному посту был разработан аппарат – испаритель ментола. А. Александер исследовал также процессы сварки в среде светильного и водяного газов. Во всех случаях проплавливающая способность таких комбинированных процессов была выше, чем в случае сварки в атмосфере воздуха, хотя при этом напряжение на дуге почти не возрастало.

В 1925 г. были разработаны способы сварки косвенной дугой неплавящимися электродами в струе водорода – атомно-водородная сварка и способ сварки плавящимся (металлическим) электродом дугой прямого действия в смеси водорода с азотом или водорода с оксидом углерода. Этот процесс получил название «способ Александера». Питание дуги производили переменным током от специального трансформатора через дроссельную катушку. Вольфрамовые электроды диаметром от 1,5 до 5,0 мм выдерживали силу тока 10–100 А при рабочем напряжении дуги 70–150 В (напряжение холостого хода в среднем составляло 300 В). Средний расход водорода равнялся 20–30 л/мин.

В 1930-е гг. из всех способов сварки плавлением наилучшее качество наплавленного металла обеспечивала атомно-водородная сварка. В этом случае металл шва практически не окислялся и не азотировался, поры отсутствовали, показатели прочности, в том числе и пластичность, были высокими. Такой способ сварки применяли для бортовых, стыковых и угловых соединений с наружным швом. Стыковое соединение толщиной до 6 мм выполняли без скоса кромок, при большей толщине – с разделкой кромок [38].

Способ атомно-водородной сварки значительно расширил диапазон свариваемых материалов и сварных конструкций. Качество сварных соединений легированных, коррозионно-стойких и жаропрочных сталей, выполненных этим способом, было достаточно высокое. Удовлетворительно сваривались также никель, хромоникелевые сплавы, молибден, вольфрам и цинк. Качество сварных соединений алюминия и его сплавов, сплавов на магниевой основе, выполненных с применением флюсов, тех же, что и для газовой сварки, отвечало требованиям, предъявленным к таким конструкциям ответственного назначения, как самолеты [39].

Первые промышленные аппараты для атомно-водородной сварки были выпущены фирмой «Дженерал электрик». Для них было предусмотрено питание от специального трансформатора с рабочим током до 35 А. Падающую характеристику и регулирование тока обеспечивали дросселем. При обрыве дуги установка обесточивалась. Водородный клапан включался с появлением тока в сварочной цепи. Первые советские аппараты завода «Электрик» повторяли зарубежные конструкции до тех пор, пока не был налажен выпуск аппаратов на базе трансформаторов СТ-22 с отдельными дросселями [38].

В дальнейшем были предприняты попытки механизировать процесс атомно-водородной сварки. Завод «Электрик» выпускает горелки с ручным механическим приводом подачи электродов. Эти горелки для вольфрамовых электродов диаметром 1,5–3,0 мм имели водяное охлаждение и крепились на самодвижущейся каретке.

Опыт, полученный при исследовании и внедрении газoeлектрической сварки, пригодился для разработки способов дуговой сварки в инертных газах и углекислом газе [39].

В период Второй мировой войны в США получила развитие сварка в струе аргона или гелия неплавящимся вольфрамовым электродом и плавящимся электродом. Этим способам сварки присвоена аббревиатура TIG и MIG.

Tungsten Inert Gas – ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа. Поскольку чаще всего в качестве материала для неплавящихся электродов используется вольфрам, в немецкоязычной литературе используют сокращение WIG (Wolfram Inert Gas); иногда встречается обозначение GTA (Gas Tungsten Arc). Может осуществляться с ручной или автоматической подачей присадочной проволоки или без нее.

При сварке в защитных газах для защиты зоны дуги и расплавленного металла от атмосферного воздействия используют специальный газ, подаваемый струей в зону плавления при помощи горелки, или сварку выполняют в камерах, заполненных газом [40].

Схема TIG-сварки показана на рис. 9.

TIG-сварка широко применяется в промышленности и в настоящее время. В качестве неплавящегося электрода используют преимущественно стержни из чистого вольфрама, реже из графита. Они могут содержать активирующие добавки оксида лантана (ЭВЛ), иттрия (ЭВИ), диоксида тория (ЭВТ). Эти добавки облегчают зажигание и поддерживают горение дуги, а также увеличивают стойкость электрода. Из-за окисления вольфрамовых электродов и их быстрого разрушения для защиты не допускается использовать газы, содержащие кислород [30].

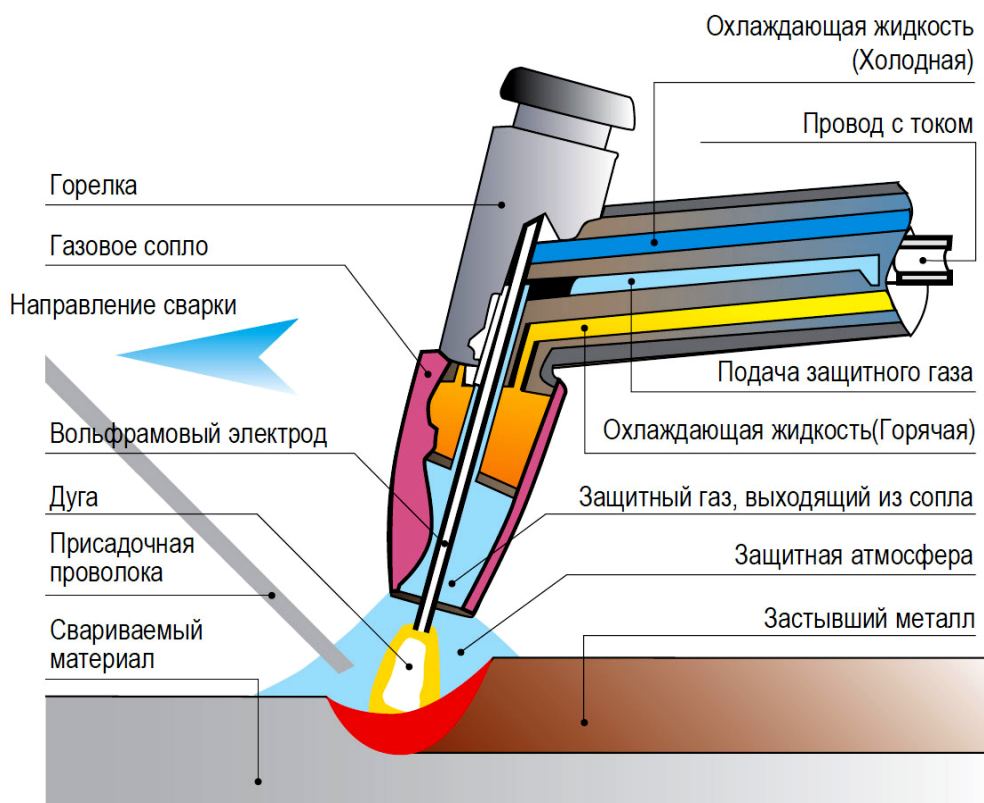


Рис. 9. Схема полуавтоматической сварки в среде защитного газа неплавящимся электродом

При полуавтоматической сварке неплавящимся электродом основным защитным газом является аргон. Будучи тяжелее воздуха в 1,38 раза, он обеспечивает хорошую газовую защиту сварочной ванны. Горение дуги в гелии происходит при более высоком напряжении (в 1,4–1,7 раза выше, чем в аргоне). По сравнению с аргонем гелий обеспечивает более стабильный дуговой процесс и большую глубину проплавления основного металла (в зоне горения дуги выделяется больше теплоты), что особенно значимо при сварке металлов с высокой теплопроводностью. Использовать аргоно-гелиевые смеси целесообразно в тех случаях, когда нужно повысить проплавляющую способность дуги без увеличения сварочного тока [41].

Технологические свойства дуги зависят от рода тока. При прямой полярности на изделия выделяется 70% тепла, что и обеспечивает более глубокое проплавление основного металла, чем при обратной полярности, где наблюдается повышенный разогрев электрода и допустимая сила сварочного тока меньше. При использовании переменного тока сила сварочного тока больше при прямой и меньше при обратной полярностях. Осциллограмма изменения параметров режима при сварке на переменном токе показана на рис. 10.

Процесс TIG-сварки дает узкую зону термического влияния, которая, в свою очередь, уменьшает напряжения, возможность появления трещин и деформации в готовом сварном шве. Косметический вид традиционного чешуйчатого шва аргонодуговой TIG-сварки передает ощущение визуального качества.

Первые сообщения о сварке в инертном газе неплавящимся вольфрамовым электродом появились за рубежом в начале 40-х гг. прошлого века. В нашей стране аналогичный способ сварки появился в конце 40-х гг.

В 1949 г. в Институте электросварки был разработан способ сварки угольным электродом в углекислом газе.

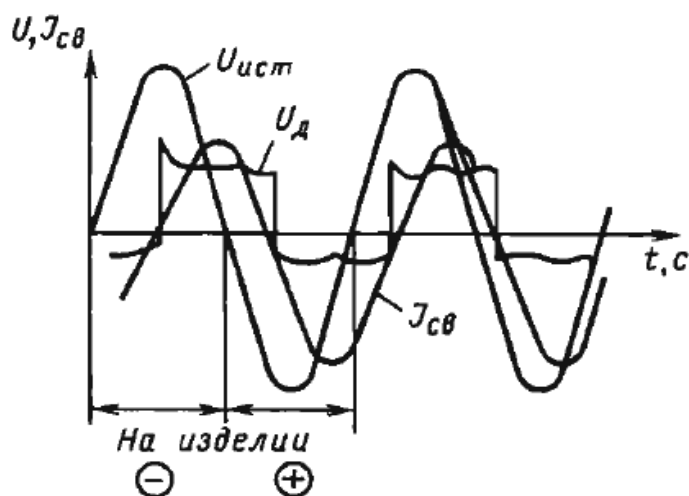


Рис. 10. Осциллограмма изменения параметров режима при сварке на переменном токе:

$U_{ист}$ – напряжение источника;

$U_{д}$ – напряжение дуги; $J_{св}$ – сварочный ток

MIG/MAG – дуговая сварка плавящимся металлическим электродом (проволокой) в среде инертного/активного газа с автоматической подачей присадочной проволоки. Это полуавтоматическая сварка в среде защитного газа – наиболее универсальный и распространенный в промышленности метод сварки [42].

В зависимости от химического состава свариваемого металла и его толщины в качестве защитных газов могут применяться инертные (аргон и гелий) или активные (углекислый газ, водород, кислород и азот) газы, а также их смеси (Ar+He; Ar+CO₂; Ar+O₂; CO₂+O₂, и др.) [43].

Схема MIG-сварки показана на рис. 11.

К особенностям полуавтоматической сварки в среде защитных газов, обеспечивающим эффективность ее применения в сравнении с другими способами сварки, относятся: высокая концентрация дуги, а, следовательно, наименьшая зона термического влияния и структурных превращений, что является предпосылкой относительно небольшой деформации изделий после сварки; более высокая производительность за счет автоматизации процесса подачи проволоки в сравнении с ручной дуговой сваркой покрытыми электродами [6].

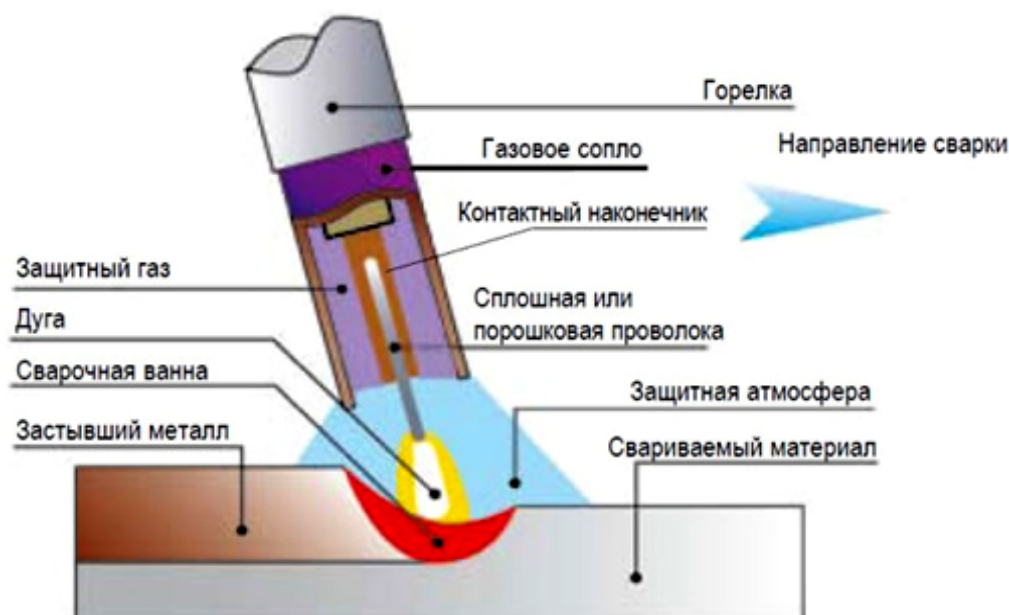


Рис. 11. Принципиальная схема полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде защитного газа

Вскоре технология MIG-сварки пришла и в Европу. По этой технологии применялись только инертные газы или аргон, содержащий лишь небольшие доли активных компонентов (например, кислорода), поэтому такая технология сокращенно называлась S.I.G.M.A. Эта аббревиатура означает «shield edinert gas metal arc» – «дуговая сварка металлическим электродом в среде инертного газа».

В России с 1953 г. вместо дорогостоящих инертных газов стали использовать при сварке углекислый газ (CO_2).

Коллективами Центрального научно-исследовательского института технологий машиностроения и Института электросварки имени Е.О. Патона (ИЭС) в 1952 г. были получены положительные результаты по сварке в углекислом газе плавящимся электродом.

Сущность сварки в среде CO_2 -газе состоит в том, что дуга горит в среде защитного газа, оттесняющего воздух от зоны сварки и защищающего расплавленный металл от кислорода и азота воздуха.

Полуавтоматическую сварку в углекислом газе применяют в единичном, мелкосерийном и реже – в серийном производстве для выполнения непротяженных швов изделий небольшой толщины [23].

Применение углекислого газа для сварки стало возможным благодаря изобретению проволочных электродов, при использовании которых учитывались большие потери легирующих элементов при сварке в активном газе.

Также огромным достижением сварочной техники явилась разработка коллективом ИЭС в 1949 г. электрошлаковой сварки, позволяющей сваривать металлы практически любой толщины. Схема электрошлаковой сварки представлена на рис. 12.

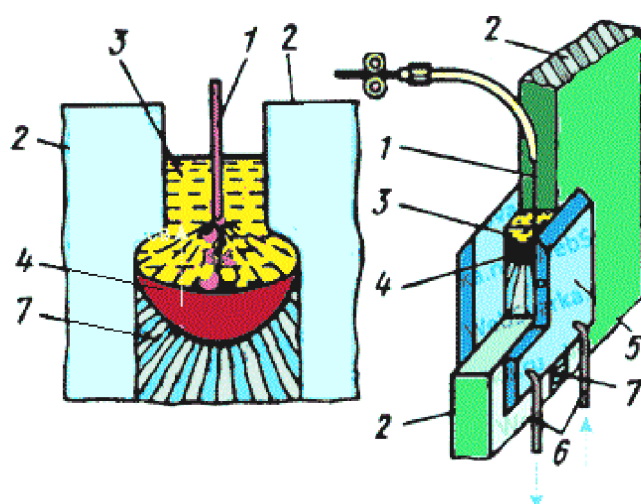


Рис. 12. Принципиальная схема электрошлаковой сварки

В отличие от других видов сварки плавлением при электрошлаковой сварке источником нагрева служит тепло, которое выделяется в ванне расплавленного флюса 3 при прохождении через нее тока от электрода 1 к изделию 2.

Свариваемый металл 2, шлаковая 3 и металлическая 4 ванны удерживаются от вытекания специальными подвижными или неподвижными формовочными медными ползунами 5, охлаждаемыми водой 6, или остающимися пластинами. Кристаллизующийся в нижней части металлической ванны расплавленный металл образует шов 7. Шлаковая ванна, находясь над поверхностью металлической ванны, соприкасаясь с охлаждаемыми ползунами, образует на них тонкую шлаковую корку, исключая

непосредственный контакт расплавленного металла с поверхностью охлаждаемого ползуна и предупреждая образование в металле шва кристаллизационных трещин.

Электрошлаковая сварка нашла применение при изготовлении конструкций из стали различных классов и марок, никелевых сплавов, титана, алюминия, меди и сплавов на их основе. Диапазон свариваемых толщин 8–2500 мм. В принципе электрошлаковым процессом можно соединять металл неограниченной толщины [7].

Авторы сварки в углекислом газе плавящимся электродом и электрошлаковой сварки К.М. Новожилив, Г.З. Волошкевич, К.В. Любавский удостоены Ленинской премии.

Важной научной основой для развития дуговой сварки явилось учение об ионизации плазмы, теоретически обоснованной в 1924 г. И. Ленгмюром в виде зависимости, определяющей степень ионизации паров вещества, испаряющегося с нагретых поверхностей. Он же определил зависимость электрического тока между электродами в вакууме от разности потенциалов между ними, назвав ее «законом трех вторых» [39].

Термин «плазма» ввели в 1929 г. И. Ленгмюр и Л. Тонкс. Большой вклад в развитие учения о плазме внесли советские ученые – Л.Д. Ландау, А.А. Власов, А.Д. Сахаров, американские ученые И.Е. Тамм, Л. Спитцер [8].

В 60-е гг. XX в. в результате проведения работ по увеличению производительности сварки неплавящимися электродами были разработаны новые сварочные материалы, оборудование и способы соединения металлов. Одним из способов повышения производительности сварки неплавящимся электродом является повышение концентрации его тепловой энергии в результате принудительного обжатия столба дуги подающимся под давлением газом. В результате теплообмена с дугой газ

нагревается, ионизируется и истекает из сопла в виде плазменной струи. Совершенствование этого процесса привело к разработке нового способа – плазменной сварки и резки [30].

Основным инструментом при плазменной сварке и резке является плазмотрон (рис. 13). В устройствах такого типа рабочий газ подается в разрядную камеру, внутри которой горит мощная дуга. За счет теплообмена с дугой газ нагревается, ионизируется и истекает через выходное отверстие камеры (сопло) в виде плазменной струи, используемой в качестве источника нагрева. Плазмой принято считать частично или полностью ионизированный газ. Плазма газового разряда при сварке в зависимости от состава среды характеризуется температурами до 30000°C [9].

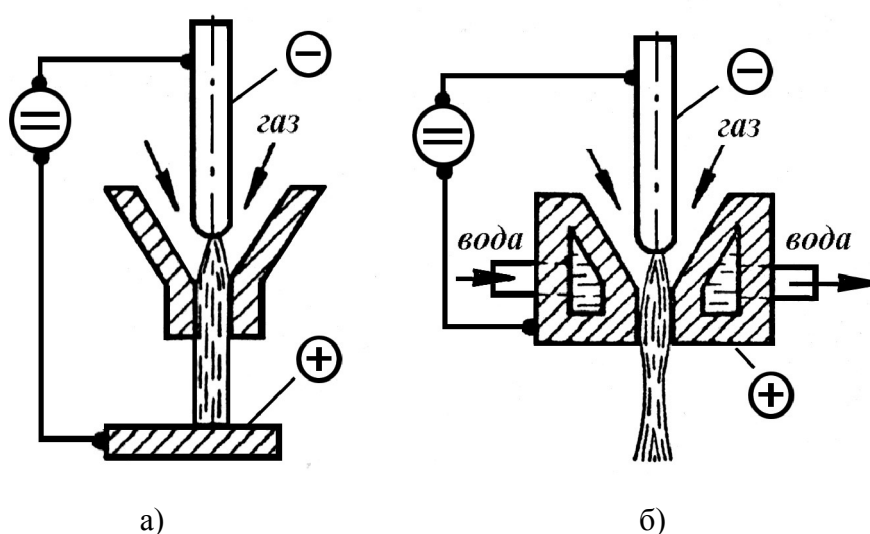


Рис. 13. Принципиальные схемы плазмотронов прямого (а) и косвенного (б) действия

Первые сварочные плазмотроны были сконструированы на базе горелок для аргонно-дуговой сварки неплавящимся электродом. Основное отличие их заключалось в применении водоохлаждаемой металлической камеры вместо керамического защитного сопла. Эта камера полностью охватывала вольфрамовый электрод, оканчиваясь соплом, соосным с

электродом и соизмеримым с диаметром столба дуги. Проходящий под давлением между водоохлаждаемыми стенками камеры и столбом дуги газ охлаждал и сжимал столб, а также обеспечивал его тепловую и электрическую изоляцию от стенок сопла [32; 44].

Применение плазменной сварки и резки в Советском союзе базировалось на результатах систематических исследований, которые проводились в Институте металлов им. А.А. Байкова под руководством Н.Н. Рыкалина.

Были изучены физические и энергетические свойства сжатой дуги в аргоне, определены ее технологические возможности. В частности, было показано, что плазменная струя проявляет ярко выраженные режущие свойства. Это обусловило сравнительно высокие темпы развития промышленных разработок в этом направлении.

До середины 60-х гг. прошлого века были разработаны ручные и механизированные установки, а также технологии для плазменной резки алюминия, меди, латуни и нержавеющей стали. Последующие работы привели к созданию процессов, в которых используются более дешевые рабочие среды, а плазмотроны имеют более высокую стойкость. Кроме того, были определены области рационального применения рабочих сред при плазменной резке. В качестве рабочих сред наиболее широко стали использоваться технические газы: азот, водород, кислород, сжатый воздух.

Было разработано несколько технологических схем процесса плазменной сварки. Для сварки тонколистовых материалов были применены малоамперные дуги, горящие в импульсном режиме. Импульсное введение тепла в металл расширяет область регулирования теплового режима сварки и существенно уменьшает теплоотвод в кромки металла. Для расширения диапазона толщин металла, свариваемого сжатой дугой, применили другой прием: снизили эффективность обжатия дуги с

одновременным увеличением диаметра канала сопла. Это позволило сваривать нержавеющие стали и алюминиевые сплавы толщиной 10 мм. Исследования по применению для сварки малоамперных дуг привели к созданию микроплазменной сварки.

Этот способ разработан в 1965 г. в Швейцарии фирмами «Сешерон» и «Мессер-Грисхайм». Для микроплазменной сварки используют малогабаритные горелки с вольфрамовым электродом, рассчитанные на сварочный ток не более 30–40 А. Данным способом сваривают листы толщиной 0,025–0,8 мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, никелевых сплавов, титана, молибдена, тантала, вольфрама, золота. Процесс ведут в непрерывном или импульсном режиме [39].

Развитие сварочной техники неразрывно связано с изысканием новых источников теплоты для плавления металла. Толчком, послужившим поиску новых способов соединения материалов, явились трудности сварки молибдена, тантала, ниобия, вольфрама, циркония, которые обнаружили в середине 60-х гг. прошлого века. Эти металлы составляют группу трудносвариваемых, так как обладают высокой температурой плавления и химической активностью, что предполагает применение для их сварки высококонцентрированных источников тепла и хорошей защиты зоны сварки.

В результате интенсивных поисков и исследований специалисты-сварщики разработали новые виды сварки, основанные на энергии интенсивных электронных, ионных и фотонных лучей. Уже первые исследования показали, что лучевые источники нагрева обладают уникальными свойствами, открывающими большую перспективу их использования в области сварки.

Разработка техники и технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) связана с работами французских и американских инженеров Д.А. Стора,

Д. Бриолы, В.Л. Вимена, которые были опубликованы в 1957–1958 гг. У истоков появления ЭЛС стоял также К.Г. Штайгервальд (ФРГ). В эти же годы в СССР в Московском энергетическом институте под руководством Н.А. Олышанского и в Институте электросварки им. Е.О. Патона под руководством Б.А. Мовчана, независимо от работ иностранных ученых, также были проведены исследования по применению электронного луча для сварки [32].

В начале 60 гг. XX в. Н.А. Олышанский и О.К. Назаренко одни из первых предложили теорию кинжального проплавления: электронный луч образует конус проплавления деталей, на передней стенке которого происходит равномерное распределение энергии. Перемещение луча относительно детали приводит к непрерывному плавлению металла и переносу его в сторону, противоположную лучу. По этой теории образование глубокого проплавления представляется как стационарный процесс.

В 1964 г. на основе экспериментальных данных, полученных при помощи скоростной киносъемки, американский ученый М. Шварц установил, что процесс взаимодействия луча и металла происходит за счет испарения и носит прерывистый характер. Им было также установлено, что распределение температур по глубине канала неравномерно: в корневой части канала $T \sim 5000 \text{ К}$, а у выходной части канала она минимальна и составляет 2500–3000 К [45].

И.В. Зуев в 1968–1967 гг. показал, что процесс внедрения электронного луча в металл с образованием канала происходит за счет периодического выброса вещества вследствие взрывообразного испарения (вскипания) металла. Было установлено, что при плотностях мощности $q=10^9\text{--}10^{10} \text{ Вт}$ скорость ввода тепла намного превышает скорость его отвода за счет теплопроводности, что приводит к взрывному вскипанию

микрообъема вещества. Эта «взрывная гипотеза» позволила перейти к первым полуколичественным оценкам параметров процесса и получила подтверждение в ряде других работ.

Таким образом, сущность электронно-лучевой сварки состоит в использовании кинетической энергии направленного потока электронов, движущихся в вакууме 10^{-2} – 10^{-3} Па. При достижении потоком электронов, ускоренных электрическим полем с разностью потенциалов 10–100 кВ и более, поверхности свариваемой детали, подавляющая часть кинетической энергии электронов превращается в тепловую. Вакуум применяют как для эффективной генерации электронного пучка и беспрепятственного прохождения его до свариваемой детали, так и для создания инертной среды без вредных примесей (кислорода, азота и водорода) [10].

Параллельно развитию электронно-лучевой сварки проводились исследования в области усиления электромагнитного поля. В 1952 г. Н.Г. Басов и А.М. Прохоров впервые в мире обосновали возможность создания усилителей и генераторов электромагнитного поля за счет индуцированного излучения квантовыми системами, находящимися в состоянии инверсной населенности [32].

За открытие нового принципа генерации и усиления электромагнитного излучения на основе квантовых систем в 1959 г. Н.Г. Басову и А.М. Прохорову была присуждена Ленинская премия.

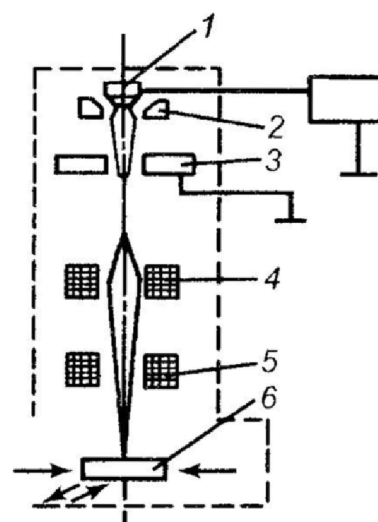


Рис. 14. Схема установки для электронно-лучевой сварки:
1 – катод; 2 – электрод; 3 – анод;
4, 5 – магнитная система;
6 – заготовка

В 1964 г. им же совместно с американским ученым Ч. Таунсом присуждается Нобелевская премия по физике за фундаментальные исследования в области квантовой электроники, приведшие к созданию приборов квантовой электроники – квантовых генераторов (мазеров) и квантовых генераторов света (лазеров) [11].

В начале 60-х гг. XX в. на основе этих работ в США был создан для сварки первый оптический квантовый генератор – лазер на рубине. Слово ЛАЗЕР является практической транскрипцией английской аббревиатуры LASER. Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – усиление света с помощью вынужденного излучения, что отражает физическую сущность процесса получения (генерации) лазерного излучения [12]. Активные разработки лазерных устройств во многих странах привели к появлению в 70-х гг. как твердотельных (рубин, неодимовые стекла и др.), так и газовых лазеров, использующих в качестве излучателей газы и газовые смеси (инертные газы, углекислый газ, смесь $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$ и др.).

За счет своих уникальных свойств лазер является практически универсальным оборудованием для обработки различных материалов. В зависимости от технических характеристик лазера возможна обработка металла, дерева, ткани, кожи, оргстекла и др. При помощи лазера можно проводить такие операции, как резка, сварка, наплавка, упрочнение, очистка, легирование. На сегодняшний день лазер и лазерные технологии являются наиболее перспективными методами соединения материалов.

Первые сообщения о лазерной сварке металлов относятся к 1962 г.

Лазерная сварка – это процесс соединения материалов (прежде всего металлов), при котором происходит расплавлением кромок с помощью концентрированного лазерного луча и образования общей ванны расплавленного металла с последующим затвердеванием.

Лазерная сварка происходит при высокой концентрации энергии, поэтому ее производительность намного превышает производительность традиционных видов сварки.

Возможно выполнение лазерной сварки в непрерывном и импульсном режиме.

Скорость лазерной сварки непрерывным излучением в несколько раз превышает скорости традиционных способов сварки плавлением. Однако лазерная сварка импульсным излучением по скорости сопоставима с традиционными способами сварки.

Лазерную сварку можно производить со сквозным и частичным проплавлением. Сварные швы одинаково хорошо формируются в любом пространственном положении.

При сварке как непрерывным, так и импульсным излучением малых толщин используют более мягкие режимы, обеспечивающие лишь расплавление металла в стыке деталей без перегрева его до температуры интенсивного испарения.

Широкое применение лазерной сварки сдерживается экономическими соображениями. Стоимость технологических лазеров высока, что требует тщательного выбора области применения лазерной сварки. Однако если применение традиционных способов не дает желаемых результатов, либо технически неосуществимо, можно рекомендовать лазерную сварку. Лазерная сварка целесообразна тогда, когда она позволяет значительно упростить технологию изготовления сварных изделий, выполняя сварку как заключительную операцию, без последующей правки или механической обработки. Экономически эффективна лазерная сварка, когда необходимо существенно повысить производительность, поскольку скорость ее может быть в несколько раз больше, чем у традиционных способов [13].

1.4. Перспективы развития способов сварки

Во второй половине XX в. произошел переход от машинно-технической революции к научно-технической, которая характеризуется широким использованием наукоемких технологий. В начале третьего тысячелетия сварка является одним из ведущих технологических процессов создания материальной основы современной цивилизации.

Сегодня сварка применяется для неразъемного соединения широкого спектра металлических, неметаллических и композиционных конструкционных материалов. Несмотря на непрерывно увеличивающееся применение в сварных конструкциях и изделиях легких сплавов, полимерных материалов и композитов, основным конструкционным материалом остается сталь. Именно поэтому мировой рынок сварочной техники и услуг возрастает пропорционально росту мирового потребления стали.

Отмеченные особенности определяют общую положительную тенденцию роста мирового производства сварных конструкций, динамичного развития мирового и регионального рынков сварочной техники и материалов, а также объемов научных исследований и разработок по совершенствованию сварки и родственных технологий. Основываясь на анализе, проведенном академиком Б. Е. Патонем, основными направлениями развития сварки и родственных технологий в XXI в. будут:

- увеличение доли механизированных и автоматических способов сварки в защитных газах, заменяющих ручную дуговую;
- развитие сварки под флюсом;
- учитывая мировые тенденции расширения области применения прогрессивных ресурсосберегающих технологий можно предположить, что доля лазерной технологии в сварочном производстве в предстоящее

десятилетие существенно увеличится и достигнет 10% общего объема сварочных работ;

– такие способы сварки, как электронно-лучевая, диффузионная и высокочастотная, занимают важное место в общих технологических процессах обработки металлов и будут развиваться в зависимости от нужд и запросов промышленности.

Сварка и родственные технологии продолжают активно и всесторонне развиваться. Создаются теоретические и технологические предпосылки изготовления новых изделий в традиционных областях сварочного производства, а также освоения все более широких сфер применения, которые раньше считались «экзотическими». Отметим ряд достижений в области совершенствования существующих технологических сварочных процессов, которые могут быть развиты в XXI в.

Для соединения деталей больших толщин разработан новый процесс электродуговой сварки с использованием специального закладного электрода, предварительно введенного в узкий зазор между свариваемыми деталями и покрытого тонким слоем (около 1 мм) изолирующего покрытия. Сварку выполняют в вертикальном положении за один проход. При этом не требуется устройств, обеспечивающих перемещение электрической дуги. Последняя движется самостоятельно по торцу плоского электрода в пределах всей ширины зазора, обеспечивая необходимое проплавление кромок.

Сварка закладным электродом выполняется в автоматическом режиме.

Данный способ является наиболее производительным при условии серийности производства и не требует последующей термообработки как в случае электрошлаковой сварки. Качество шва по механическим свойствам

не уступает обычным дуговым процессам сварки. Так же экономится сам металл, так как сварка выполняется в узкий зазор равный 8–10 мм.

Процесс основан на способности электрической дуги самостоятельно перемещаться по торцу плоского изолированного электрода большого сечения (до 1000 мм²), предварительно заложенного в стык между свариваемыми деталями (рис. 15). При этом автоматически устанавливаются основные параметры режима сварки и обеспечивается эффективное проплавление стыка при низких плотностях тока на электроде в диапазоне 0,7–3,0 А/мм².

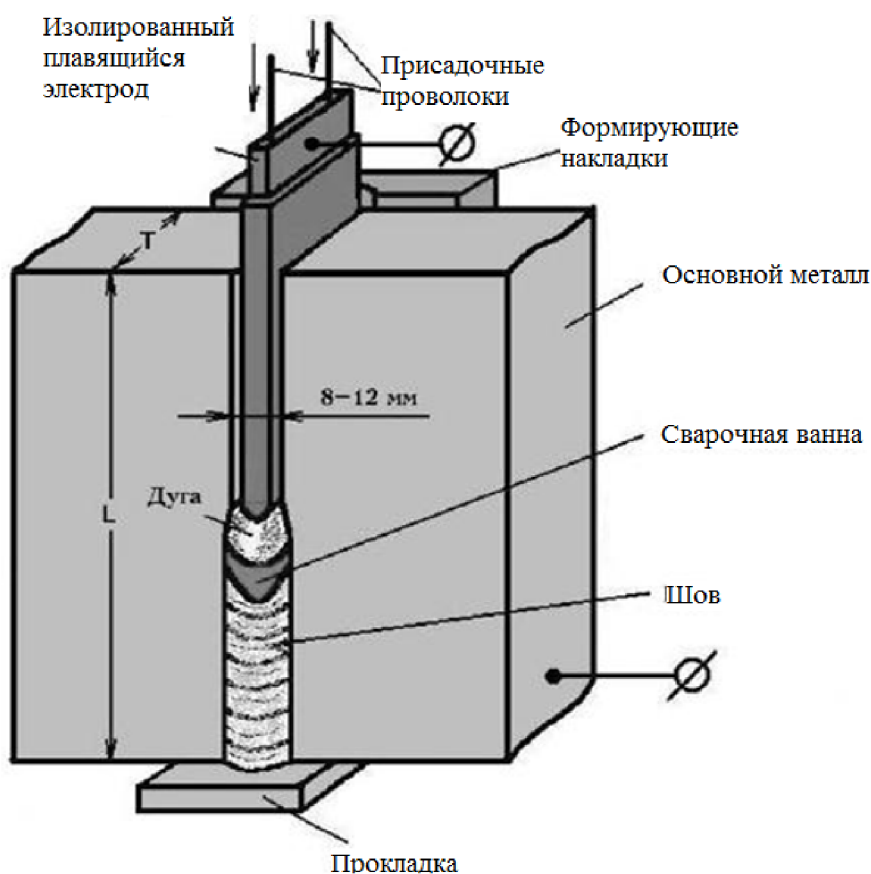


Рис. 15. Электродуговая сварка с использованием специального закладного электрода

Закладной электрод имеет специальное электроизолирующее покрытие толщиной до 1,5 мм. Кроме электроизолирующих свойств, покрытие электрода обеспечивает эффективную газошлаковую защиту

зоны сварки (содержание остаточного водорода в шве менее $5 \text{ см}^3/100 \text{ г}$), а также рафинирование и дополнительное легирование металла шва. Дефицит металла шва компенсируется либо за счет перемещения в зону сварки самого закладного электрода, либо посредством подачи через него порошковых или сплошного сечения проволок. При использовании проволок для компенсации дефицита металла шва закладной электрод выполняет функцию неподвижного плавящегося мундштука.

Формирование поверхности шва выполняется медными боковыми накладками или ползунами. Они же обеспечивают выведение из зоны сварки избытка шлака, что исключает переход процесса из электродугового в электрошлаковый [14].

В последние годы сформировалось новое направление в технологии лазерной сварки, а именно, гибридные способы сварки: двухлучевой лазерной, лазерно-дуговой, лазерно-индукционной, лазерно-плазменной, лазерно-светолучевой, которые находят все большее применение в промышленности вследствие своей высокой технико-экономической эффективности.

Соединение различных методов сварки с лазерной в единый технологический сварочный процесс позволяет нивелировать недостатки каждого метода и расширить технологические возможности процесса сварки.

Гибридная лазерно-дуговая сварка – это такой метод сварки, при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном действии лазерного излучения и сварочной дуги. Схема лазерно-дуговой сварки представлена на рис. 16.

При совместном действии дуги и лазерного луча с одной стороны детали основанием дуги служит образованная лазерным лучом приповерхностная плазма, что способствует повышению скорости сварки,

так как дуга, подплавляя поверхностный слой металла, способствует повышению коэффициента поглощения лазерного излучения.

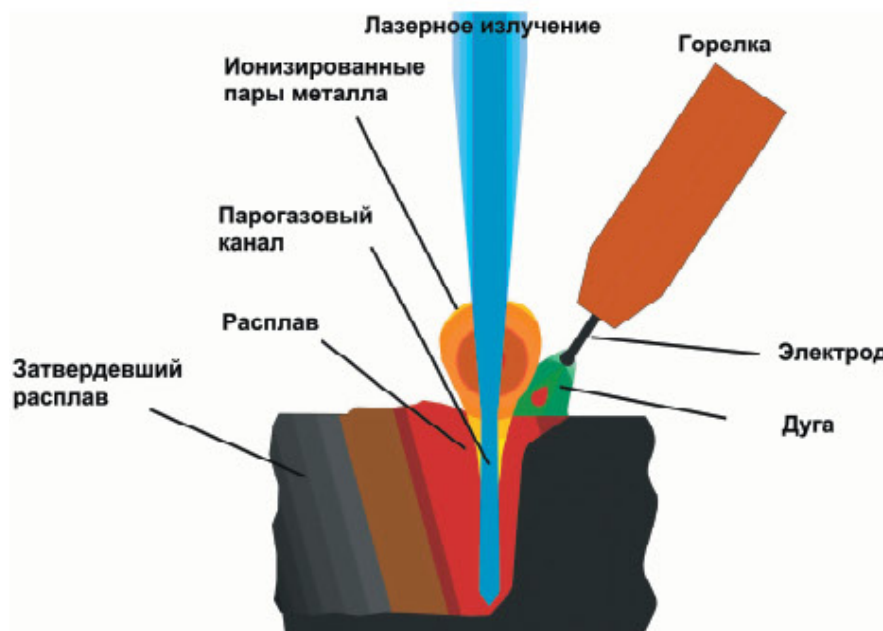


Рис. 16. Схема процесса лазерно-дуговой сварки

Процесс лазерно-дуговой сварки может осуществляться неплавящимся или плавящимся электродом. При использовании неплавящегося электрода дуга зажигается впереди по ходу сварки. Дуга подогревает металл и расплавляет его верхний слой, а лазерный луч осуществляет глубокое проплавление. В случае использования плавящегося электрода электрическую дугу зажигают позади лазерного излучения, которое проплавляет только соприкасающиеся части металла, а формирование сварного шва осуществляет электрическая дуга за счет плавления сварочного электрода [15].

Гибридная лазерно-светолучевая сварка – это способ сварки, при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном действии лазерного излучения и светового луча. По мере развития науки и техники, различные физические явления, связанные со световым

излучением, находят все более широкое применение в научных и промышленных целях.

Гибридная технология лазерно-светолучевой сварки обеспечивает повышение скорости сварки тонколистовых соединений толщиной до 1,0 мм. Световой луч обеспечивает уменьшение зазора перед лазерным лучом за счет нагрева кромок тонколистового стыка, что исключает прожоги тонколистовых соединений и снижает затраты на подготовку кромок. Лазерно-светолучевая обработка позволяет программировать термический цикл в зоне обработки.

В настоящее время выпускаются переносные светолучевые сварочные установки, которые предназначены для ручной светолучевой сварки металлов и неметаллических материалов, сварки их комбинаций, пайки и резки металлов. В горелке используется ксеноновая дуговая лампа мощностью от 1,0 до 2,0 кВт с комбинированной системой водяного и воздушного охлаждения лампы. Горелки установок снабжены набором сменных насадок для выполнения работ в защитных газах и термической резки различных материалов. С помощью этих установок сваривают металлы толщиной от 0,1 до 1,0 мм.

Одним из направлений развития гибридных лазерных технологий обработки материалов является технология двухлучевой лазерной обработки материалов, т.е. такого способа сварки, при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном воздействии двух лучей лазера.

Гибридная лазерно-индукционная сварка – это способ сварки, при котором формирование сварной ванны происходит при одновременном действии лазерного излучения и токов высокой частоты.

Жесткий термический цикл, сопутствующий лазерной сварке, имеет, с одной стороны, определенные преимущества (малые зоны термического воздействия, уменьшение влияния межкристаллитной коррозии, снижение

уровня продольных и поперечных деформаций), а с другой стороны, в ряде случаев, может приводить к снижению технологической прочности сварного соединения.

Уменьшение жесткости сварочного термического цикла может быть реализовано использованием гибридной лазерно-индукционной сварки, т.е. когда сварочная ванна формируется при одновременном воздействии луча лазера и токов высокой частоты (ТВЧ-нагрев). Лазерно-индукционная сварка, сохраняя все преимущества лазерной сварки, уменьшает жесткость термического цикла и повышает свариваемость. Лазерно-индукционная сварка позволяет сваривать пружинные, цементируемые стали, а также чугун.

Гибридная лазерно-плазменная сварка – это способ сварки, при котором формирование сварочной ванны происходит при одновременном действии луча лазера и плазменной струи.

Путем совместного воздействия на образование сварочной ванны лазерного луча и плазменной струи реализуется комбинированный лазерно-плазменный процесс сварки. Такая комбинация приводит к улучшению пространственной стабилизации пятна дуги на поверхности металла и повышению устойчивости ее горения при малых токах и больших скоростях перемещения. Одновременно происходящий нагрев металла плазмой приводит к локальному повышению температуры в зоне нагрева и, как следствие, изменению оптических свойств поверхности и, соответственно, к увеличению коэффициента поглощения лазерного излучения. В итоге эффективность лазерной сварки возрастает, что особенно важно при использовании лазеров небольшой мощности. Все это позволяет, с одной стороны увеличить скорость и стабильность плазменной сварки, а с другой – повысить эффективность и снизить себестоимость лазерной сварки [15].

Глава вторая

ПРИМЕНЕНИЕ СВАРКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ

ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

2.1. Общие положения

На сегодняшний день сварка является одним из ведущих технологических процессов. Многочисленные области и сферы человеческой деятельности, так или иначе, соприкасаются с работами, в которых задействована сварка. Многообразие сварочных технологий предоставляет возможность производить работы разного уровня сложности и в самых различных условиях.

Теплообменные аппараты используются практически во всех отраслях промышленности. Их основная задача – обеспечить передачу тепла от одного теплоносителя к другому и тем самым решить проблемы охлаждения, нагрева элементов технологического оборудования или обеспечить температурный режим технологических процессов [16].

При производстве теплообменного оборудования сварка играет важную роль, так как с помощью сварки получают корпус теплообменных аппаратов (обечайку, днища и крышки), производят вварку патрубков и штуцеров для ввода и вывода теплоагентов, а также производят сварку пучков труб в трубной решетке, в ряде случаев в качестве теплообменных элементов применяют электросварные трубы.

Таким образом, качество изготовления теплообменного оборудования во многом зависит от качества сварных соединений.

Основной задачей, которую необходимо решить при разработке технологии сборки и сварки теплообменных аппаратов, является обеспечение качества выпускаемых изделий, соответственно, выбор оптимального способа сварки, подбор режимов, изготовление оснастки в соответствии с геометрической формой и размерами свариваемого узла.

Теплообменные аппараты – оборудование, работающее в экстремальных условиях – при высоких значениях температуры и давлении, что и определяет требования к сварным швам.

Например, продольные и поперечные швы обечаек стальных сосудов должны быть только стыковыми. При этом если свариваемые части сосуда имеют разную толщину, необходимо предусмотреть размещение специального переходного элемента с постепенным утончением толщины.

Если избыточное давление в аппарате превышает 0,07 МПа, то для такого аппарата необходимо соблюдать Правила Ростехнадзора, которые устанавливают основные требования к изготовлению, испытанию, безопасной эксплуатации оборудования.

Для безопасной эксплуатации оборудования его подвергают гидравлическим испытаниям и испытаниям на герметичность. При гидравлических испытаниях значение пробного давления p_0 зависит от расчетного давления p и определяется по формуле:

$$p_0 = 1,25p \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_t},$$

где $[\sigma]_{20}$ – допустимые напряжения материала корпуса при температуре 20°C; $[\sigma]_t$ – допустимые напряжения материала корпуса при рабочей температуре.

Время испытаний определяется исходя из условий работы аппарата и исполнительной толщины стенки.

Результаты испытаний считаются удовлетворительными, если во время их проведения не наблюдается падения давления по манометру, отсутствуют течи, потение, пузырьки воздуха или газа в сварных соединениях и на основном металле, признаки разрыва и течи в разъемных соединениях, а также отсутствует остаточная деформация.

Помимо гидравлических испытаний могут проводиться испытания на герметичность. Их проводят в целях определения утечек в местах сварных швов люминесцентным методом или путем смачивания керосином. Керосин вследствие малого значения коэффициента поверхностного натяжения обладает хорошей проникающей способностью. Сварные швы с одной стороны обильно смачиваются керосином, а с другой – покрываются мелом. В местах наличия трещин или пор на мелованной стороне шва выступают пятна. Время выдержки в зависимости от толщины металла и расположения шва составляет от 20 до 40 минут [17].

Таким образом, правильный выбор способа сварки и его режимов является немаловажным этапом для обеспечения высокого качества выпускаемого теплообменного оборудования.

2.2. Характеристика теплообменного оборудования

Теплообменный аппарат – устройство, в котором осуществляется теплообмен между двумя теплоносителями, имеющими различные температуры [46]. По принципу действия теплообменники делятся на рекуператоры и регенераторы. В рекуператорах подвижные теплоносители разделены стенкой [3–5; 46; 47].

Теплообменники применяются в технологических процессах нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической, криогенной, атомной, технике, энергетике и коммунальном хозяйстве. В зависимости от области их применения в промышленности используются различные конструкции теплообменного оборудования. Существуют аппараты, в которых одновременно с процессами теплообмена протекают и смежные процессы, такие как фазовые превращения, например, конденсация, испарение, смешение. Такие аппараты имеют свои наименования:

конденсаторы, испарители, градирни, конденсаторы смешения. В зависимости от направления движения теплоносителей рекуперативные теплообменники могут быть прямоточными, противоточными и перекрестным током теплоносителей [3–5; 48].

Для изготовления теплообменной аппаратуры широко применяются углеродистые и легированные стали, а также цветные металлы и их сплавы.

Для изготовления аппаратуры важнейшими показателями пригодности материалов являются механические свойства, которые определяют испытанием образцов на прочность, упругость, пластичность, ударную вязкость, твердость и выносливость. Кроме того, материалы подвергаются испытанию для выявления их пригодности к сварке, а также различным способам обработки в холодном и горячем состоянии.

К материалам, предназначенным для изготовления теплообменной аппаратуры, кроме того, предъявляют требования по теплоемкости, теплопроводности, термостойкости и другим теплофизическим свойствам.

При изготовлении и ремонте тепломассообменной аппаратуры наиболее распространенным материалом служат низкоуглеродистые стали. Низкоуглеродистые стали характеризуются удовлетворительными механическими свойствами, достаточно прочны при нагреве до 450 °С, хорошо воспринимают динамические нагрузки и не склонны к хрупкому разрушению. Эти стали имеют удовлетворительную коррозионную стойкость в неагрессивных средах, дешевы и наименее дефицитны.

Марки сталей выбираются исходя из условия работы оборудования: рабочей температуры, давления, наличия и степени агрессивности среды [49].

Применение углеродистых и легированных сталей при производстве теплообменного оборудования можно рассмотреть на примере

кожухотрубчатого теплообменного аппарата, основной частью которого является трубный пучок, состоящий из теплообменных элементов, изготавливаемых из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Выбор данной марки стали обусловлен тем, что она может сохранять свои свойства в температурных пределах от -70 до $+350$ °С.

Кроме того, эти стали имеют высокую коррозионную стойкость, выдерживающие влияние коррозии при температуре до 900°C . Сталь 12Х18Н10Т хорошо сваривается как ручной, так и автоматической сваркой [50; 51].

Согласно принятой классификации, нержавеющие стали относятся к высоколегированным коррозионностойким сталям, которые различают по содержанию основных легирующих элементов – хрома и никеля и по составу основы сплава. Высоколегированными аустенитными сталями считают сплавы на основе железа, легированные различными элементами в количестве до 55%, содержание хрома и никеля обычно не выше 15 и 7%, соответственно. К аустенитным сплавам относят железоникелевые сплавы с содержанием железа и никеля более 65% и никелевые сплавы с содержанием никеля не менее 55% [52].

Кроме трубного пучка в конструкцию теплообменного аппарата входят трубные доски, корпус, камеры, перегородки и патрубки. Если условия работы оборудования близки к нормальным, то эти детали выполняются из углеродистой стали Ст3сп, Ст20 и легированной стали 09Г2С [52].

Для изготовления специальной теплообменной аппаратуры, которая по условиям эксплуатации работает при низких температурах, применяется медь в чистом виде. Согласно ГОСТ 859-78 «Медь. Марки», для изготовления такой аппаратуры применяется медь марок М1, М2 и М3.

Медь хорошо обрабатывается давлением в холодном и нагретом состояниях, но плохо обрабатывается резанием и имеет ограниченные литейные свойства.

Для изготовления калориферов, конденсаторов, радиаторов и кожухотрубчатых теплообменных аппаратов, благодаря хорошим механическим и технологическим свойствам, используются латуни марок Л63 и Л68. Бронза применяется для изготовления арматуры, работающей с водяным паром при температуре до 200°C. Для изготовления теплообменной аппаратуры, работающей при воздействии морской воды, успешно применяются алюминиевые бронзы марок БрА5, БрА7.

Наряду со сталями и медными сплавами для изготовления теплообменной аппаратуры широко применяется никель марок Н-1, Н-2, отличающиеся хорошими механическими свойствами и высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах.

Для изготовления коррозионностойкого оборудования, работающего под давлением, применяется и титан, по механическим свойствам превосходящий лучшие марки стали. Титан марки ВТ1 допускает нагрев стенок аппарата до 350°C. При повышенных температурах (~ 400°C) снижается предел прочности металла с 600 до 230 МПа и предел текучести с 470 до 190 МПа. Титан обладает высокой коррозионной стойкостью к растворам соляной, муравьиной, уксусной и другим органическим кислотам, влажному хлору и морской воде. Однако стоимость аппаратуры из титана в 5 раз выше стоимости таких же аппаратов, изготовленных из нержавеющей стали [49].

Таким образом, выбор того или иного материала для теплообменного оборудования зависит от конкретных условий его эксплуатации. От выбранного материала во многом зависит способ сварки, который будет применен при изготовлении теплообменного оборудования.

В связи с этим рассмотрим более подробно способы сварки, используемые в процессе изготовления теплообменного оборудования, и их особенности при сварке, в том числе и из нержавеющей сталей.

2.3. Применяемые способы сварки для производства теплообменных аппаратов

При производстве теплообменных аппаратов сварка является основным видом соединения металлических частей между собой.

При подготовке деталей к сварке для снятия внутренних напряжений применяют термообработку свариваемых деталей. Термообработка является важным этапом при изготовлении сварного соединения, так как остаточные внутренние напряжения являются одним из основных факторов, стимулирующих коррозионное растрескивание в агрессивных средах. Обычно термообработку стальных сварных конструкций с целью снятия сварочных напряжений проводят при температуре 620–650°C [53].

Большое количество конструктивно-технологических решений по сварке труб с трубными досками в теплообменных аппаратах связано с особенностями и спецификой работы данного узла, так как он в процессе эксплуатации находится в условиях высоких переменных напряжений, связанных с изменением температуры и давления. Поэтому при проектировании и выборе технологии сварки нужно при наименьших производственных затратах обеспечить качественное сварное соединение, для условий надежной долговременной эксплуатации [54].

В этой связи необходимо контролировать химический состав шва, производить тщательную очистку кромок перед сваркой, выбирать конструкцию из условий наиболее простого выполнения соединений. Большое значение придается выбору основного и присадочного металлов, чтобы при сварке избежать образования трещин и пористости в сварных швах.

Для изготовления труб используют низкоуглеродистые нержавеющие стали, а также хромоникелевые и никелево-медные сплавы [53].

На основании изучения и анализа имеющихся технологических решений, выявления их положительных качеств и недостатков, изучения последствий, вносимых сваркой, а также взаимодействий рассматриваемого узла или элемента конструкции с рабочими нагрузками, можно прийти к более оптимальному решению с позиций повышения работоспособности конструкции.

2.3.1. Ручная дуговая сварка

Ручная дуговая сварка – это процесс дуговой сварки штучными электродами, при которой подача электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок производится вручную [55].

Ручная дуговая сварка является наиболее распространенным методом сварки и характеризуется следующими преимуществами:

- для сварки используется простое, недорогое оборудование, которое может быть переносным;
- не требуется дополнительной газовой или флюсовой защиты, так как и то и другое получается из электродного покрытия;
- этот способ сварки можно использовать в местах с ограниченным доступом;
- ручная дуговая сварка пригодна для сварки большинства черных, цветных металлов и сплавов (углеродистых, легированных и нержавеющих сталей, чугуна, химически разнородных металлов, а также меди, никеля, алюминия и их сплавов) практически любой толщины;

– сварка может выполняться в любом пространственном положении, что благоприятствует применению этого процесса сварки для соединений, которые не могут быть размещены в нижнем положении.

Общепринятое обозначение ручной дуговой сварки MMA – Manual Metal Arc (Welding) – ручная металлическая дуговая сварка [56].

При ручной дуговой сварке дуга горит между стержнем электрода и основным металлом. Под действием теплоты дуги электрод и основной металл плавятся, образуя металлическую сварочную ванну. Капли жидкого металла с расплавляемого электродного стержня переносятся в ванну через дуговой промежуток. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода, образуя газовую защиту вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну на поверхности расплавленного металла (рис. 17) [57; 58].

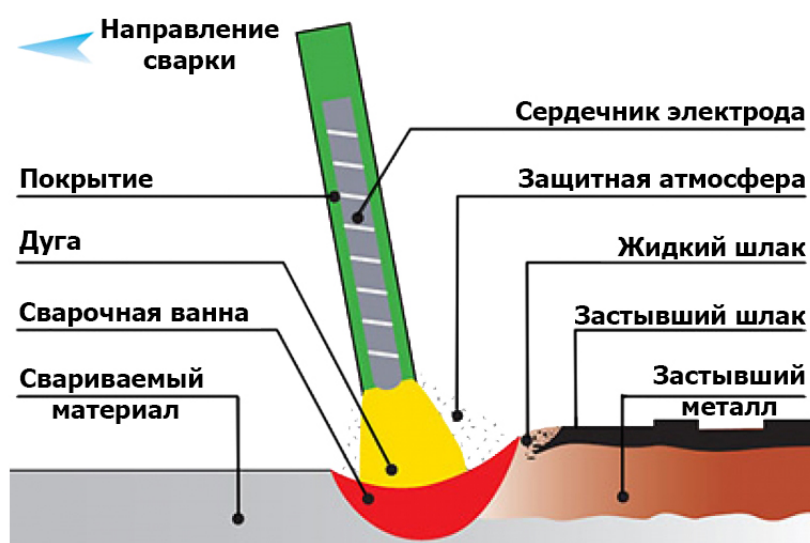


Рис. 17. Схема процесса ручной дуговой сварки плавящимся электродом

Металлическая и шлаковая ванны вместе образуют сварочную ванну. По мере движения дуги металл сварочной ванны затвердевает и образует сварной шов. Жидкий шлак по мере остывания образует на поверхности шва твердую шлаковую корку, которая после остывания шва удаляется ручным или механическим способом.

Покрытие электродов подбирается из условия обеспечения заданного состава и свойств сварного шва, а также защиты расплавленного металла и дуги от вредного воздействия окружающего воздуха при помощи газов и шлака, выделяющихся при его плавлении. Кроме того, шлак, покрывающий расплавленный металл, обеспечивает его правильное формирование при кристаллизации.

Для образования и поддержания электрической дуги к электроду и свариваемому изделию подводится электроэнергия от специальных источников питания постоянного или переменного тока [35; 59].

На рис. 18 представлена схема поста ручной дуговой сварки.

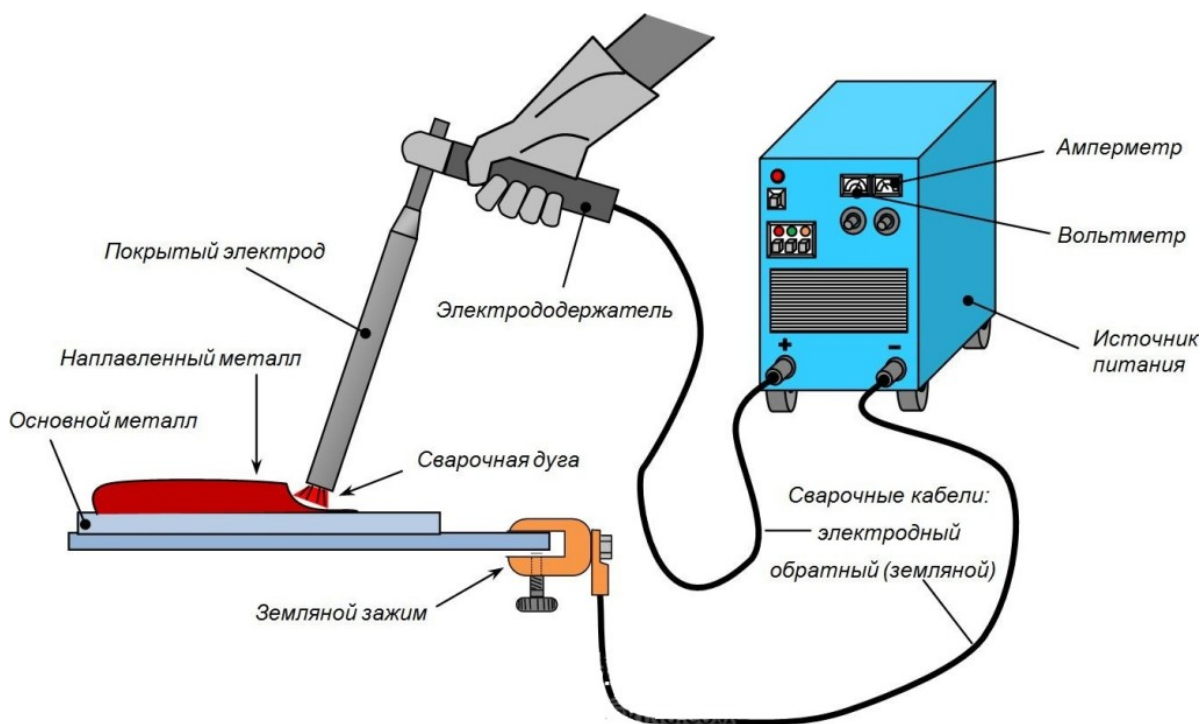


Рис. 18. Схема поста ручной дуговой сварки

Для ручной дуговой сварки могут применяться плавящиеся и неплавящиеся электроды. В первом случае формирование сварного шва происходит при расплавлении самого электрода, во втором случае – при расплавлении присадочной проволоки, которую вводят непосредственно в сварочную ванну [60].

Процесс ручной дуговой сварки может выполняться как на переменном, так и на постоянном токе, что определяется характеристиками применяемого электрода. Некоторые из электродов предусмотрены исключительно для сварки на постоянном токе, а другие – как на постоянном, так и на переменном токе. Род тока сварки и его полярность влияют на скорость расплавления покрытых электродов [6; 36; 43; 60].

Сварочная дуга постоянного тока всегда более стабильна, чем дуга переменного тока. Это обусловлено тем, что при горении дуги постоянного тока не происходит смены полярности, как это происходит при сварке на переменном токе. Большинство универсальных электродов, предназначенных для сварки как на постоянном, так и на переменном токе, все же лучше себя ведут на постоянном токе.

При сварке постоянным током сварочная дуга может быть прямой или обратной полярности. При прямой полярности к электроду подводится минус, а к свариваемому изделию плюс, при обратной полярности к электроду подводится плюс, а к изделию минус [43; 60].

Полярность сварочной дуги имеет большое значение, так как в процессе на изделии и торце электрода возникают две области, которые называются катодным и анодным пятном. При сварке анодное пятно возникает на плюсе, а катодное на минусе. В области анодного пятна выделяется больше тепла (до 3900°C), чем в области катодного пятна (до 3200°C). То есть при сварке постоянным током обратной полярности большее количество тепла выделяется на изделии, что приводит к более глубокому провару корня шва. Сварка же на прямой полярности характеризуется менее глубоким проплавлением, большой скоростью плавления электрода. Поэтому прямую полярность, как правило, применяют при сварке тонколистовых изделий, сварке легкоплавких

металлов. При обратной полярности скорость плавления электродного металла выше на 10–40% чем при прямой полярности.

При сварке на переменном токе, полярность тока может меняться до 100 раз в секунду. Поэтому соблюдение полярности при сварке на переменном токе отсутствует [36; 43].

Для ручной дуговой сварки на постоянном токе в качестве источников питания используют преобразователи, агрегаты и выпрямители, для сварки на переменном токе сварочные трансформаторы [58; 61; 62].

Сварочные выпрямители рекомендуется применять для сварки в закрытых отапливаемых помещениях, потому что чувствительны к перепадам температур; в монтажных условиях лучше использовать преобразователи и трансформаторы. Существуют универсальные источники питания, которые применяют в случае частого изменения характера свариваемых изделий. В местах, где отсутствуют электрические сети (в полевых условиях), используют сварочные агрегаты (с двигателями внутреннего сгорания), эти же агрегаты можно применять для сварки ответственных конструкций при сильном колебании напряжения питающей сети. Для работы в условиях повышенной влажности и тропического климата используют специальные источники [61].

Ручная дуговая сварка плавящимся электродом является на сегодняшний день самым распространенным методом сварки ввиду возможности проведения сварочных работ как в закрытых помещениях, так и на открытых участках. С помощью данного метода свариваются практически все материалы, в том числе и высоколегированные аустенитные стали, в частности, 12Х18Н10Т.

Данная марка стали относится к хорошо свариваемым, т.е. она не требует предварительного или сопутствующего подогрева в процессе

сварки. Однако при ее нагреве до температуры 500–800°C образуется межкристаллитная коррозия. При этом по границам зерен аустенита выпадают карбиды хрома. Это может иметь неприятные последствия – разрушение детали в процессе эксплуатации [63].

Для устранения этого явления при сварке применяют электроды с защитно-легирующим покрытием основного вида в сочетании с высоколегированным электродным стержнем [40]. Это обеспечивает нужный химический состав и свойства сварного шва. Для сварки 12X18H10T применяют электроды марок ОК61.25, ОК61.30, ОК61.35, ОК61.80 и др., ряд электродов стабилизированы ниобием, что обеспечивает стойкость металла шва против межкристаллитной коррозии [64].

К недостаткам ручной дуговой сварки можно отнести:

- перерывы в работе, связанные с заменой электрода. Как только остаточная длина электрода достигает длины примерно 50 мм, сварщик должен остановить процесс сварки и вставить в держатель вместо огарка новый электрод;
- необходимость удалять шлак после выполнения шва, а также в местах замков шва или перед следующим проходом;
- первые два фактора не позволяют повысить коэффициент использования рабочего времени выше 25%, что значительно ниже по сравнению с процессами сварки, использующими электродную проволоку, например, MIG/MAG-сварки;
- из-за наличия огарков и вследствие возможного разрушения покрытия имеет место большие потери электродов. В целом использует не более 65% электрода;
- этот способ не может быть применен для сварки металлов с низкой температурой плавления, таким как свинец, олово и цинк, а также их

сплавам, так как не обеспечивает низкого тепловложения, требуемого в данном случае;

– этот способ не подходит для сварки таких химически активных металлов, как титан, цирконий и тантал, так как не обеспечивает требуемой защиты металла шва и околошовной зоны от окисления кислородом.

Однако следует отметить, что применение ручной дуговой сварки плавящимся электродом постоянно росло и достигло максимума в 1960–1970 гг. Затем ручная дуговая сварка начала терять свое значение в пользу более высокопроизводительных технологий, таких как полуавтоматическая сварка плавящимся и неплавящимся электродом. Тенденции развития сварочной техники свидетельствуют о том, что объем использования ручной дуговой сварки покрытыми электродами будет сокращаться и в дальнейшем, однако она еще долгое время не потеряет своего значения.

2.3.2. Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа

Общепринятое обозначение полуавтоматической сварки плавящимся электродом в среде защитного газа MIG/MAG – Metal Inert/Active Gas – дуговая сварка плавящимся металлическим электродом (проволокой) в среде инертного/активного защитного газа [56].

При MIG/MAG-сварке плавящийся металлический электрод является одновременно присадочным материалом и носителем электрической дуги.

Схема сварочного поста при полуавтоматической сварке плавящимся электродом в среде защитного газа представлена на рис. 19.

Через два или четыре ведущих ролика сварочная проволока подается в сварочную горелку, где в контактном наконечнике происходит переход тока. Свободный конец проволоки концентрически окружен газовым

соплом. Выходящий потоком защитный газ препятствует химической реакции расплавленного металла сварочной ванны с окружающим воздухом [42].

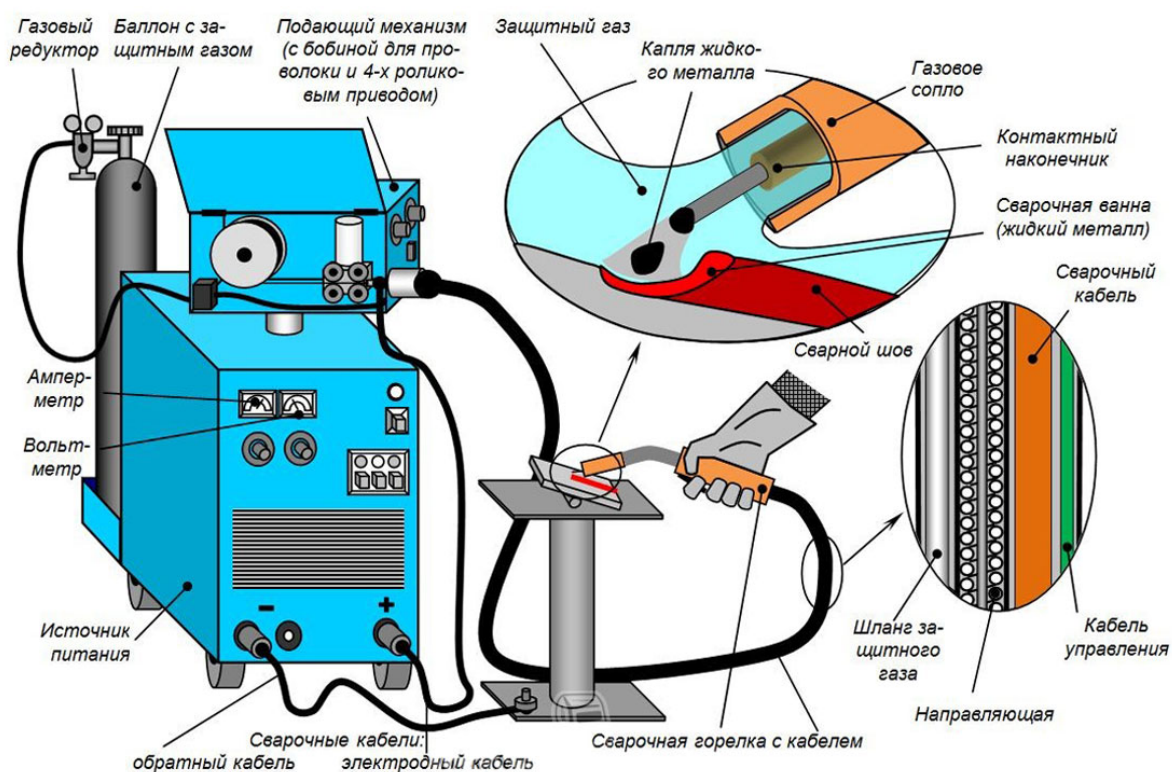


Рис. 19. Схема сварочного поста при полуавтоматической сварке плавящимся электродом в среде защитного газа

При полуавтоматической дуговой сварке плавящимся электродом оборудование предусматривает автоматическое регулирование длины дуги и скорость плавления электрода, перемещение сварочной горелки осуществляется сварщиком с определенной скоростью [40; 65].

При сварке плавящимся электродом шов образуется за счет проплавления основного металла и расплавления электродной проволоки.

Защитный газ подается в зону сварки через газовое сопло, защищает дугу и химически активный металл сварочной ванны от взаимодействия с окружающей средой.

В качестве защитного газа могут применяться как инертные, так и активные газы. В зависимости от того, какой газ применяется, говорят о сварке металла инертным газом (MIG) и сварке металла активным газом (MAG) [23; 66; 67].

Инертные газы не взаимодействуют с металлом сварочной ванны и подходят в первую очередь для сварки алюминия и меди. Активные газы – это главным образом смеси инертных газов на основе аргона и компонентов кислорода или углекислого газа. Они являются сравнительно химически активными, т.е. вступают в химические реакции с расплавленным металлом.

В настоящее время аргон широко применяется в качестве защитного газа при сварке алюминиевых сплавов и высоколегированных сталей (особенно нержавеющей хромоникелевых). Но при сварке углеродистых и низколегированных сталей основных структурных классов на российских предприятиях основным защитным газом для MIG/MAG процесса продолжает оставаться углекислый газ CO_2 [59; 68].

Применение аргона позволяет повысить температуру сварочной дуги, что улучшает проплавление сварного шва, увеличивая производительность сварки в целом. При сварке в среде аргона (как и иных инертных газов) минимизируется выгорание активных легирующих элементов, что позволяет использовать более дешевые сварочные проволоки.

В то же время применение углекислого газа при сварке плавящимся электродом имеет свои преимущества, связанные с химико-металлургическими процессами, происходящими при сварке. Углекислый газ имеет высокую плотность и сам по себе способен обеспечить качественную защиту реакционного пространства за счет диссоциации молекул углекислого газа на оксид углерода и свободный кислород.

В качестве защитных газовых смесей для сварки плавящимся электродом во всех промышленно развитых странах давно уже не применяют чистый углекислый газ. Для этого используются газовые смеси. От выбора защитной газовой смеси зависит качество сварки. Так, смеси, содержащие в своем составе гелий, повышают температуру сварочной дуги, что улучшает проплавление сварного шва, увеличивая производительность сварки в целом. Повышение производительности сварочных работ при применении газовых смесей составляет не менее 30–50%.

Кроме того, применение газовых смесей при полуавтоматической сварке обеспечивает еще и повышенные свойства металла сварного соединения, что в ряде случаев позволяет отказаться от последующей термообработки, что всегда трудоемко [69].

Для сварки в углекислом газе высоколегированных аустенитных сталей применяется проволока, обеспечивающая требуемую коррозионную стойкость и механические свойства за счет повышенного содержания титана, ниобия и элементов ферритизаторов – кремния, алюминия, хрома. Для сварки сталей типа 12X18H10T используют проволоки Св-07X18H9ТЮ, Св-08X20H9C2БТЮ, для сталей типа 12X18H12Т – проволоку Св-08X25H13БТЮ, а для хромоникелемолибденовых сталей – проволоки Св-06X19H10M3Т и Св-06X20H11M3ТБ [52].

При полуавтоматической сварке в среде защитного газа управление процессом сварки и режимом дуги осуществляется тремя основными элементами установки для сварки в среде защитного газа:

- 1) сварочной горелкой и подающим рукавом;
- 2) механизмом подачи проволоки;
- 3) источником сварочного тока.

Сварочная горелка и подающий рукав выполняют три функции – подают защитный газ в область горения дуги, подают сварочную проволоку к контактному наконечнику и подводят сварочный ток к контактному наконечнику. На рукоятке горелки имеется выключатель, нажатие на который включает и выключает сварочный ток, подачу проволоки и подачу газа.

Механизм подачи сварочной проволоки и источник сварочного тока для обеспечения автоматического саморегулирования длины дуги соединены обратной связью.

Для MIG/MAG-сварки применяются два типа источников сварочного тока: источник с постоянным (неизменным) током и источник с постоянным (неизменным) напряжением [70].

В качестве источника тока при сварке плавящимся электродом (проволокой) в среде защитных газов применяется полуавтомат.

Схема сварочного полуавтомата представлена на рис. 20.

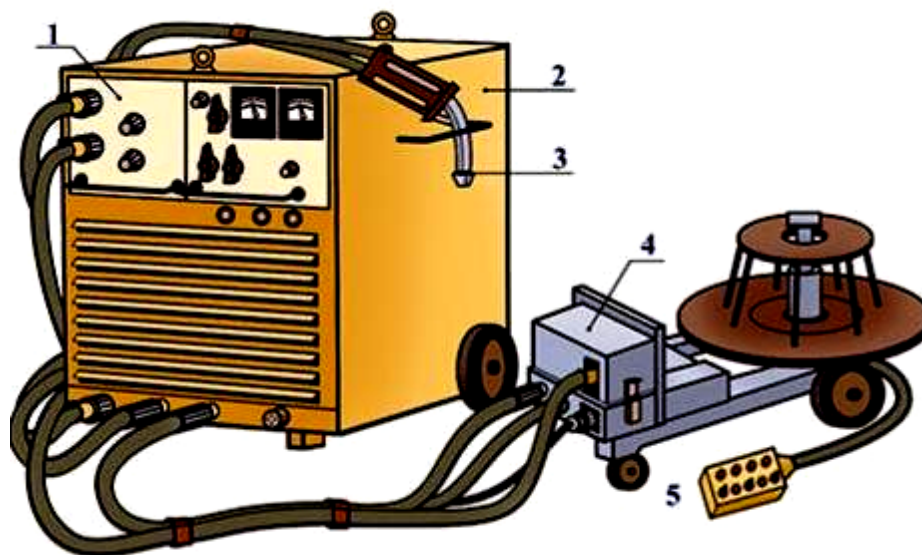


Рис. 20. Схема сварочного полуавтомата:
1 – встроенный блок; 2 – сварочный выпрямитель; 3 – сварочная горелка;
4 – механизм подачи электродной проволоки; 5 – пульт управления

Сварочный полуавтомат состоит из сварочного источника питания, блока подачи сварочной проволоки, системы управления, специальной сварочной горелки и комплекта соединительных кабелей и шлангов. В качестве источника питания в сварочном полуавтомате может быть использован обычный сварочный выпрямитель или сварочный инвертор [71].

Сварочный выпрямитель – это аппарат, преобразующий переменный ток сети в постоянный ток для сварки [9].

Инверторный сварочный аппарат – это аппарат с инверторным источником питания, преобразующим переменное напряжение сети в напряжение и ток для сварки. Основными компонентами инверторного источника питания обычно являются:

- сетевой выпрямитель, преобразующий входное переменное напряжение в постоянное;
- инвертор, преобразующий далее постоянное входное напряжение в переменное высокой частоты;
- высокочастотный трансформатор, понижающий напряжение, преобразованное инвертором;
- выходной высокочастотный выпрямитель;
- сглаживающий дроссель.

Применение в сварочных полуавтоматах инверторных источников питания значительно повышает качество сварки и расширяет спектр свариваемых материалов. Наиболее высокое качество сварки возможно при использовании инверторных источников питания с импульсным режимом [72].

Блок подачи проволоки сварочного полуавтомата служит для размещения, правки и подачи сварочной проволоки в сварочную горелку. Сварочная проволока для сварочных полуавтоматов поставляется

намотанной на стандартные пластиковые катушки диаметром 200 и 300 мм или проволочные каркасы. В сварочных полуавтоматах используется сварочная проволока диаметрами 0,8, 1,0, 1,2 и 1,6 мм.

В качестве альтернативы защитным газам может быть использована порошковая проволока с оболочкой, при сварке которой происходит выделение газов, создающих защитную среду для электрической дуги. Порошковые проволоки обеспечивают также надежную газовую защиту при работе на открытом воздухе и сквозняках.

2.3.3. Полуавтоматическая сварка порошковой проволокой

Общепринятое обозначение полуавтоматической сварки порошковой проволокой FCAW-Flux Core Arc Welding – дуговая сварка плавящейся порошковой проволокой [56].

При использовании в качестве плавящегося электрода самозащитной проволоки позволяет проводить сварку без применения защитного газа. Схема сварки самозащитной порошковой проволокой показана на рис. 21.

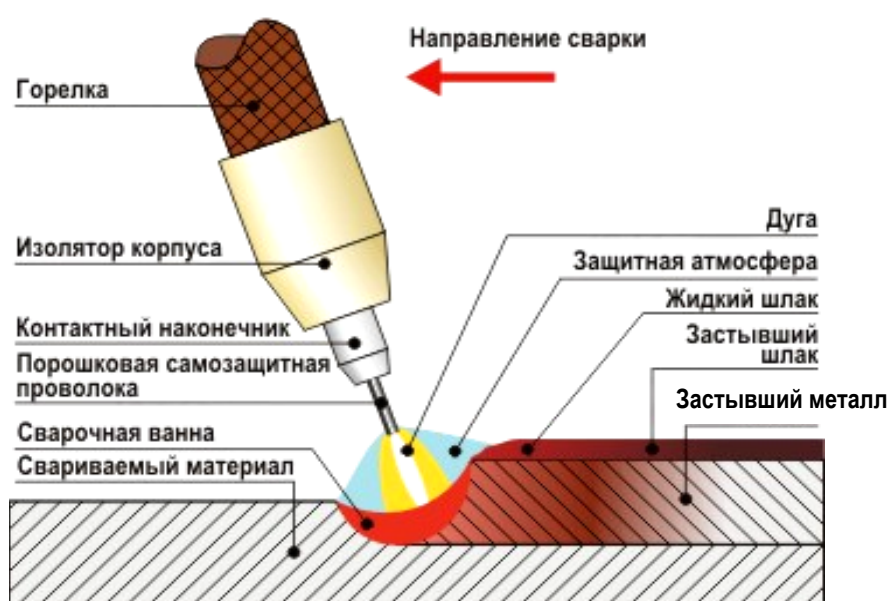


Рис. 21. Схема сварки самозащитной порошковой проволокой

Порошковая проволока представляет собой металлическую оболочку, плотно наполненную порошкообразными легирующими элементами – шихтой [73]. Металлическая оболочка, к которой через поверхность подводится сварочный ток, удерживает порошковый сердечник и позволяет осуществлять непрерывный процесс плавления при малом вылете электрода и подаче непосредственно в зону сварки защитных материалов порошковой части электрода. Газообразующие и шлакообразующие материалы порошковой проволоки осуществляют газовую и шлаковую защиту металла зоны сварки за счет входящих в их состав компонентов [30].

В настоящее время изготавливается порошковая проволока в основном пяти типов (рис. 22). Оболочка порошковой проволоки 1 и 2 типов представляет собой простую трубку; в 3 и 4 типах один или два края стальной ленты заформованы в оболочке, 5 тип выполнен в виде двух разделенных оболочек. Порошковая проволока изготавливается диаметром от 1,6 до 3,6 мм. Для нее используется лента из низкоуглеродистой стали марки 08 кп холодного проката в состоянии «мягкая» или «особо мягкая» [74].

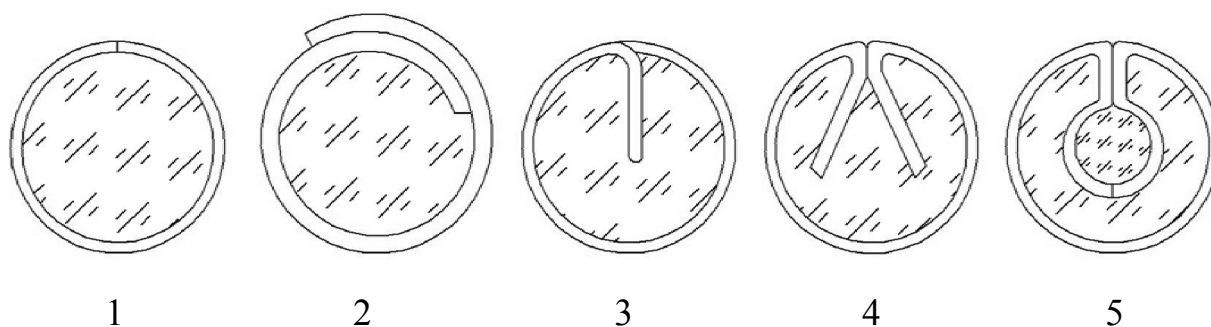


Рис. 22. Конструкции оболочек порошковых проволок [30]

Выбор марки и диаметра порошковой проволоки определяется маркой свариваемой стали, требованиями к металлу сварного шва и сварного соединения, толщиной металла и условиями выполнения сварки.

При этом учитываются технологические особенности применения проволоки и возможные пределы изменения режимов сварки, производительность и экономическая целесообразность использования.

Для сварки 12X18H10T применяют порошковую проволоку марок ОК Tubrod 14. 20, ОК Tubrod 14. 34.

Сварка порошковой проволокой, как правило, выполняется на постоянном токе обратной полярности. Перед выполнением сварки необходимо проконтролировать готовность оборудования и качество проволоки, а также произвести настройку режима применительно к намеченному объекту сварки [75].

Режим сварки устанавливается в соответствии с рекомендациями с учетом толщины металла, типа соединения и технологических особенностей проволоки.

Если сравнивать полуавтоматическую сварку в защитных газах с другими способами сварки, то она обладает следующими преимуществами:

- получением высококачественных сварных швов на металлах и сплавах различного химического состава и толщины;
- возможностью сварки в различных пространственных положениях;
- возможностью визуального наблюдения за формированием шва;
- отсутствием флюса и операции по удалению шлака;
- высокой производительностью и легкостью механизации и автоматизации;
- низкой стоимостью при использовании активных защитных газов.

Основным недостатком полуавтоматической дуговой сварки в защитных газах при выполнении работ в монтажных условиях является необходимость организации надежной защиты зоны сварки от ветра и

сквозняков, приводящих к разрушению газовой защиты места сварки и образованию пор в сварном шве. А габаритные размеры сварочной горелки ограничивают применение полуавтоматической сварки в труднодоступных местах, имеет место разбрызгивание металла [43].

2.3.4. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа

Общепринятое обозначение ручной дуговой сварки неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа TIG – Tungsten Inert Gas – дуговая сварка плавящейся порошковой проволокой [56].

Сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе осуществляется за счет тепла, образующегося при горении электрической дуги между электродом и основным металлом. Температура в столбе дуги при TIG-сварке может достигать 19500°C [76].

Сущность процесса TIG-сварки показана на рис. 23.

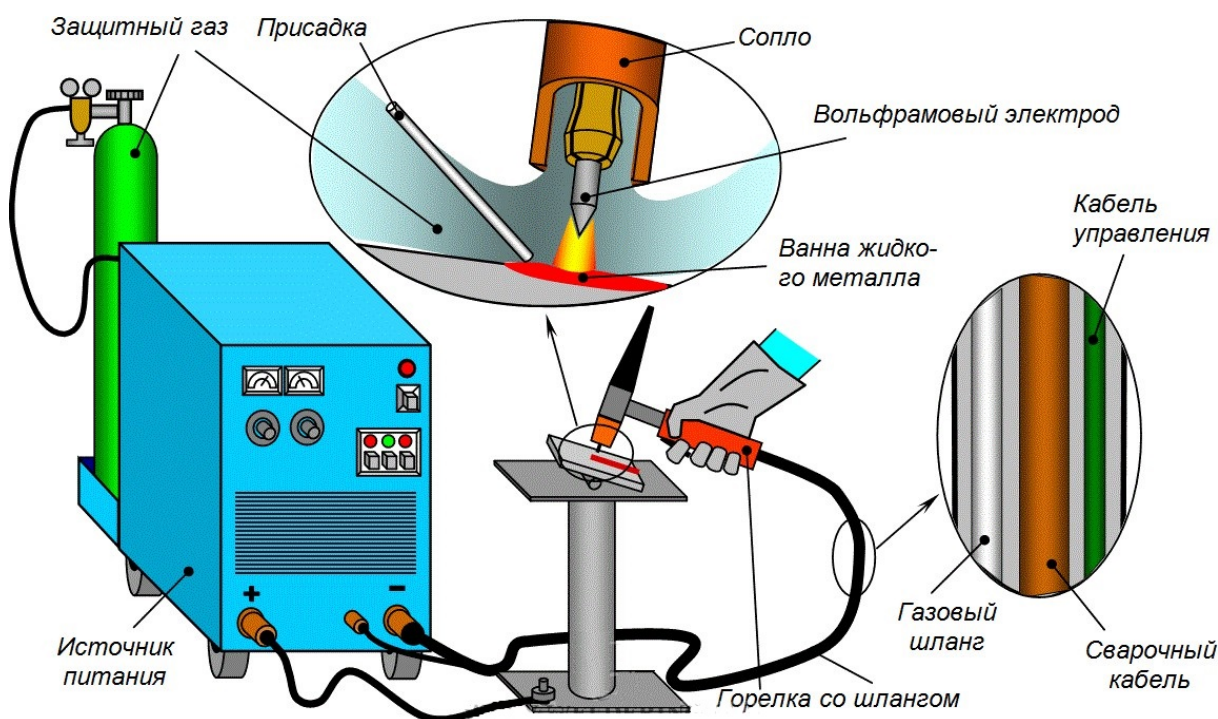


Рис. 23. Схема сварочного поста при полуавтоматической сварке неплавящимся электродом в среде защитного газа

Вольфрамовый электрод закрепляется в токопроводящем устройстве специальной горелки, к которой по шлангам подводится токоведущий провод и защитный инертный газ. Истекающая из сопла горелки струя аргона оттесняет воздух и надежно защищает электрод, дугу, сварочную ванну и околошовную зону от окисления и азотирования. Если возникает необходимость в присадочном металле для заполнения сварного шва, то в дугу подается присадочная проволока, как правило, того же или близкого химического состава, что и свариваемый металл. Присадочная проволока, как правило, подается вручную. Существует множество систем для подачи проволоки в зону горения дуги, пригодных для автоматизации процесса.

Неплавящиеся электродные стержни изготавливают из вольфрама, электротехнического угля или прессованного графита. Температура плавления вольфрама равна 3600°C , – кипения 5900°C . Кроме того, вольфрам обладает малой летучестью при высоких температурах, отличается высокой электро- и теплопроводностью.

В сварочной практике применяют вольфрамовые стержни диаметром от 0,8 до 6 мм, иногда до 10–12 мм (ТУ ВМ2-529-57). Выбор диаметра вольфрамового электрода производится в зависимости от величины и рода тока и защитного газа. Электроды изготавливаются из чистого вольфрама или с добавкой окиси циркония, тантала, иттрия и др. Применение добавок облегчает процесс зажигания дуги, ведет к увеличению устойчивости дугового разряда и повышению стойкости электрода [77; 78].

Последнее свойство обеспечивает возможность повышения плотности тока в электроде, так как при этом конец электрода не меняет формы в процессе сварки.

Сварка угольным или графитовым электродами выполняется в среде CO_2 -газа или без газовой защиты. Обычно применяются электроды диаметром от 5 до 25 мм длиной 200–300 мм. Угольные электроды имеют

высокую температуру плавления и кипения, малую теплопроводность. Графитовые электроды обладают большей электропроводностью и большей стойкостью при высоких температурах по сравнению с угольными электродами, что заметно снижает удельный расход материала и позволяет проводить сварку при повышенных плотностях тока.

Следует отметить, что понятие «неплавящийся электрод» условно, так как в процессе сварки электрод все же испаряется. Однако расход электрода незначителен. Кроме того, материал электрода практически не участвует в образовании шва [70; 78].

TIG-сварка позволяет сваривать стали, в том числе нержавеющей, никелевые сплавы, титан, алюминий, алюминиевые и магниевые сплавы, медь, бронзу и даже золото. Можно сваривать разнородные металлы, например, медь с латунью и нержавеющей сталь с низкоуглеродистой сталью. Этим способом можно соединять вручную, полуавтоматически или автоматически разнообразные металлы и сплавы толщиной от десятых долей до десятков миллиметров [76].

Автоматическая дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа получила обозначение GTAW – Gas Tungsten Automatic Welding [56]. Может осуществляться как с автоматической подачей присадочной проволоки, так и без нее.

Ограниченный характер дуги в процессе сварки неплавящимся электродом и контролируемое тепловложение в свариваемые детали дает узкую зону термического влияния, и ведет к увеличению прочности сварного шва. Высокая концентрация тепла – преимущество при сварке металлов с высокой теплопроводностью, например, меди и алюминия.

При TIG-сварке отсутствует перенос расплавленного металла через дуговой промежуток. Это в значительной мере облегчает условия горения дуги и обуславливает более высокую ее стабильность. Нет расплавленных

капель металла и нет брызг: если свариваемый металл не загрязнен, то нет и искр. Сокращаются потери на испарение, и ограничивается взаимодействие расплавленного металла с газовой фазой столба дуги. При сварке неплавящимся электродом создаются благоприятные условия для защиты сварочной ванны и формирования шва [76].

Присадочный металл подается в головную часть сварочной ванны. Сварщик вручную контролирует перемещение сварочной горелки и подачу проволоки. Количество присадочного металла подбирается из условия образования качественного сварного шва. При сварке стыковых соединений без разделки кромок присадочный металл необходим в основном для создания усиления шва [79; 80].

Сварка неплавящимся вольфрамовым электродом производится на прямой полярности (минус на электроде). При установившейся дуге электронный поток движется от отрицательного электрода горелки к положительному электроду (изделию), а поток положительно заряженных ионов – к электроду.

Прямая полярность позволяет получить узкую, сконцентрированную дугу, дающую глубокое проплавление и, соответственно, большую скорость сварки. Электрод получает меньшую часть тепловой энергии дуги и будет иметь меньшую температуру, чем при сварке на переменном токе или при сварке на обратной полярности, что, в свою очередь, позволяет уменьшить диаметр вольфрамового электрода и снизить расход защитного газа [79–81].

Основным преимуществом процесса TIG-сварки является высокое качество швов при способности сварки практически всех металлов и сплавов, в том числе титана, циркония, ниобия, тантала, аустенитных никель-хромовых жаропрочных сплавов.

В настоящее время перспективным направлением развития TIG-сварки является автоматизация, в частности роботизация.

Роботизированная TIG-сварка обеспечивает ряд преимуществ, в том числе автоматизацию и повторяемость, однородность и последовательность сварных швов с увеличением производительности – особенно если учесть скорость позиционирования горелки между сварными швами. С помощью сварочного робота обеспечивается доступ к сварным швам, к которым он может быть затруднен для ручной горелки или, например, если требуется вращение горелки во время сварки, что было бы невозможно при ручном процессе.

Нержавеющая сталь, титан, инконель, алюминий и специальные стали часто свариваются при помощи TIG-сварки. Роботизированная TIG-сварка обеспечивает преимущества для каждого из этих материалов.

Титан обладает широким диапазоном эксплуатационных температур и имеет самое высокое отношение прочности к весу среди металлов. Тем не менее, титан имеет высокую температуру плавления и не очень устойчив к коррозии в процессе сварки. Роботизированная TIG-сварка титана может обеспечить точность повторяемых процессов, уменьшая риски при его сварке.

Нержавеющая сталь имеет высокое содержание хрома, который при ручной TIG-сварке может быть перегрет. Роботизированная TIG-сварка нержавеющей стали может быть использована, чтобы предотвратить нежелательные потемнения металла, отрицательно влияющие на внешний вид изделий.

Для жаропрочных сплавов, таких как никель, используемых в аэрокосмической и ядерной промышленности, наиболее трудно добиться 100-процентного проплавления при ручной сварке. Роботизированная TIG-

сварка обеспечивает силу тока по отношению к скорости, чтобы управлять профилем глубины проплавления.

Применение роботизированной TIG-сварки стимулировало развитие сложной, но экономически эффективной системы технического зрения, что существенно улучшило контроль над процессом сварки, благодаря отслеживанию местоположения горелки [82].

При выборе сварочного аппарата для TIG-сварки необходимо знать, какая требуется мощность источника для проводимых работ, необходимо оценить объем работ, нужен ли переменный ток или достаточно постоянного тока источника питания. Алюминий и магний свариваются переменным током, а нержавеющие конструкционные стали – на постоянном токе. Если требуется варить материалы из двух групп, то применяют аппараты с постоянным и переменным током AC/DC.

Аппараты для TIG-сварки, как правило, доступны с диапазоном сварочного тока от 150А до 500А, они также могут быть использованы для пайки и сварки штучными электродами [70].

В настоящее время на основе инверторных преобразователей уже серийно выпускаются многофункциональные сварочные аппараты. Наибольшее распространение получили аппараты совмещающие сварку MIG/MAG +TIG+ MMA. Встречаются и другие комбинации. Дело в том, что инверторная схема, применяемая в источнике питания для сварки, позволяет «на ходу» менять тип внешних вольт-амперных характеристик (ВАХ) источника питания. Именно тип ВАХ является основным свойством источника для того или иного вида сварки.

Кроме того, в настоящее время все большее распространение получают синергетические схемы управления, когда цифровые процессоры аппарата запрограммированы таким образом, что режим сварки можно регулировать, изменяя всего один параметр – остальные

немедленно отреагируют на это изменение, и вся совокупность параметров обеспечит переход на другой режим с оптимальным качеством сварки. Например, при полуавтоматической сварке в такой неразрывной цепочке находятся: сварочный ток, скорость подачи и диаметр проволоки, пространственное положение шва и необходимый, при этом, характер переноса металла в дуге (капельный, струйный, импульсный). Только при строгой взаимосвязи этих параметров мы получим высокое качество сварки, «синергетические» схемы управления эти связи успешно обеспечивают [83].

В настоящее время на большинстве предприятия узлы теплообменного аппарата изготавливаются сваркой неплавящимся электродом в среде защитного инертного газа (TIG-сварка). Сварку стали 12X18H10T методом TIG-сварки используют в тех случаях, когда свариваемый металл является очень тонким или к сварному соединению предъявляются повышенные требования в отношении качества.

Нержавеющие трубы, используемые для транспортировки газов или жидкостей под давлением, лучше всего сваривать именно вольфрамовым электродом в инертном газе. Сварку ведут переменным или постоянным током прямой полярности в среде аргона. В качестве присадочной, желательно использовать проволоку, имеющую более высокую степень легирования, чем основной металл.

Но при сварке данным способом могут возникать прожоги, коробление поверхности, в зоне сварного соединения наблюдаются окисления, что ухудшает товарный вид изделия. Повышение качества, снижение длительности технологического цикла сварки, т.е. увеличение производительности и снижение себестоимости требует замены существующего способа TIG-сварки на более производительный и качественный способ [7; 35; 70; 78–80].

На сегодняшний день способы полуавтоматической сварки плавящимся (MIG-сварка) или неплавящимся электродом в среде защитного инертного газа (TIG-сварка) применяются для изготовления крупногабаритных теплообменных аппаратов. Неоспоримым их преимуществом является возможность применения данных способов сварки в монтажных условиях, когда окончательная сборка оборудования происходит на месте работы аппарата. Но с развитием конструкции теплообменного оборудования, направленного на снижение массогабаритных показателей при сохранении требуемой мощности, появился значительный объем теплообменного оборудования, сборка которого происходит в цеховых условиях. Развитие теплообменного оборудования требует и развития технологий сварки. В связи с этим в последние годы для сварки нового высокоэффективного оборудования все больше находит применение лазерная сварка [10].

2.3.5. Лазерная сварка

Общепринятое обозначение лазерной сварки LBW-Laser Beam Welding – сварка лазерным лучом [56].

Лазерный луч по сравнению с обычным световым лучом обладает рядом свойств: направленностью, монохроматичностью и когерентностью.

Благодаря направленности лазерного луча его энергия концентрируется на сравнительно небольшом участке. Если обычный «белый» свет состоит из лучей с различными частотами, то лазерный луч является монохроматичным, т.е. имеет определенную частоту и длину волны. За счет этого он отлично фокусируется оптическими линзами, поскольку угол преломления луча в линзе постоянен.

Когерентность – это согласованное протекание во времени нескольких волновых процессов. Некогерентные колебания светового луча

обладают различными фазами, в результате чего могут погасить друг друга. Когерентные же колебания вызывают резонанс, который усиливает мощность излучения.

Таким образом, лазерный луч – это вынужденное монохроматическое излучение широкого диапазона длин волн от единиц нанометров до десятков и сотен микрометров, обладающее рядом уникальных свойств: высокой монохроматичностью и когерентностью, низкой расходимостью и высоким удельным энергетическим свойством. Совокупность этих свойств позволила создать перспективный вид высококонцентрированного источника энергии, который нашел широкое применение в различных отраслях машиностроения.

В настоящее время сфокусированный луч лазера, как сварочный источник энергии, является единственным высококонцентрированным источником энергии, обеспечивающим получение плотности мощности – $E \geq 0,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/см}^2$ в зоне обработки при атмосферных условиях, обладающий самым высоким коэффициентом сосредоточенности теплового сварочного источника энергии по сравнению с известными классическими сварочными источниками энергии – газопламенным, электродуговым, индукционным, плазменным [12].

Лазерный луч с помощью оптических систем легко транспортируется и направляется в труднодоступные места. При этом обеспечивается надежное и оперативное управление процессом лазерной сварки с регулируемыми энергетическими характеристиками. В отличие от электронного луча, дуги и плазмы на лазерный луч не влияют магнитные поля свариваемых деталей и технологической оснастки. Это позволяет получать устойчивое формирование сварного соединения высокого качества по всей длине [84].

Благодаря высокой концентрации энергии лазерного излучения в процессе сварки образуется малый объем расплавленного металла, незначительные размеры зоны термического влияния, высокие скорости нагрева и охлаждения металла шва и околошовной зоны. Эти особенности теплового воздействия определяют минимальные деформации сварных конструкций, особенности физико-химических и металлургических процессов в деталях при лазерной сварке, высокую технологическую прочность и определенные характеристики полученных сварных соединений.

Для лазерной сварки обычно используются следующие типы лазеров: твердотельные и газовые – с продольной или поперечной прокачкой газа [12; 84].

При лазерной сварке твердотельным лазером в качестве активного тела используется стержень из рубина, стекла с примесью неодима (Nd-Glass) или алюмо-иттриевого граната, легированного неодимом (Nd-YAG) либо иттербием (Yb-YAG). Он размещается в осветительной камере. Для возбуждения атомов активного тела используется лампа накачки, создающая мощные вспышки света.

Схема твердотельного лазера приведена на рис. 24.

По торцам активного тела размещены зеркала – отражающие и частично прозрачные. Луч лазера выходит через частично прозрачное зеркало, предварительно многократно отражаясь внутри рубинового стержня и усиливаясь.

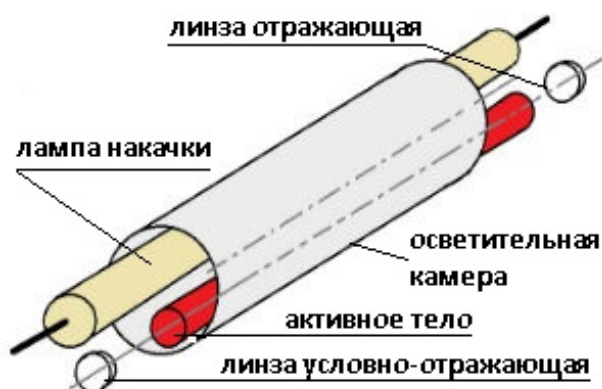


Рис. 24. Схема твердотельного лазера

Мощность твердотельных лазеров обычно не превышает 1–6 кВт.

В газовых лазерах в качестве активного тела используют смесь газов, обычно $\text{CO}_2 + \text{N}_2 + \text{He}$. Схема газового лазера с продольной прокачкой газа приведена на рис. 25.

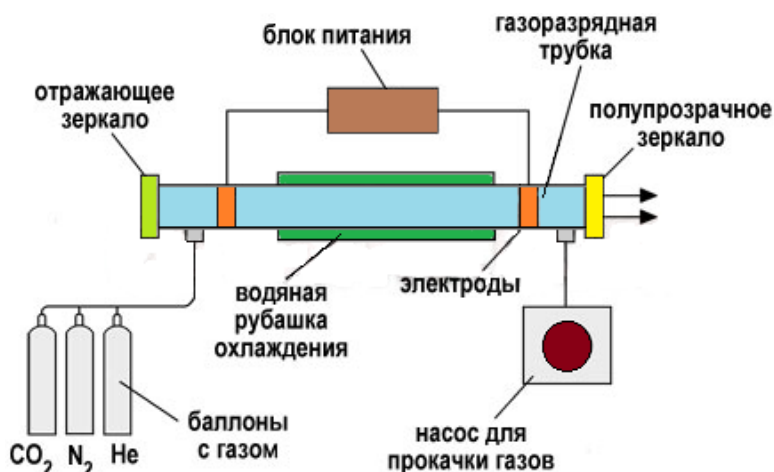


Рис. 25. Схема газового лазера с продольной прокачкой газа

Газ из баллонов прокачивается насосом через газоразрядную трубку. Для энергетического возбуждения газа используется электрический разряд между электродами. По торцам газоразрядной трубки расположены зеркала. Электроды подключены к источнику питания. Лазер охлаждается водяной системой.

Недостатком лазеров с продольной прокачкой газа являются их большие габаритные размеры. Более компактны лазеры с поперечной прокачкой газа (рис. 26).

Газовые лазеры позволяют достичь общей мощности 20 кВт и больше, что дает возможность сваривать металлы толщиной до 20 мм с достаточно высокой скоростью, около 60 м/ч.

Лазерная сварка производится в атмосферных условиях, без создания вакуума, необходима защита расплавленного металла от воздуха. Обычно для защиты используются газы, в частности аргон.

Схема процесса лазерной сварки приведена на рис. 27.

Особенностью процесса лазерной сварки является то, что вследствие высокой тепловой мощности луча на поверхности свариваемого изделия происходит интенсивное испарение металла.

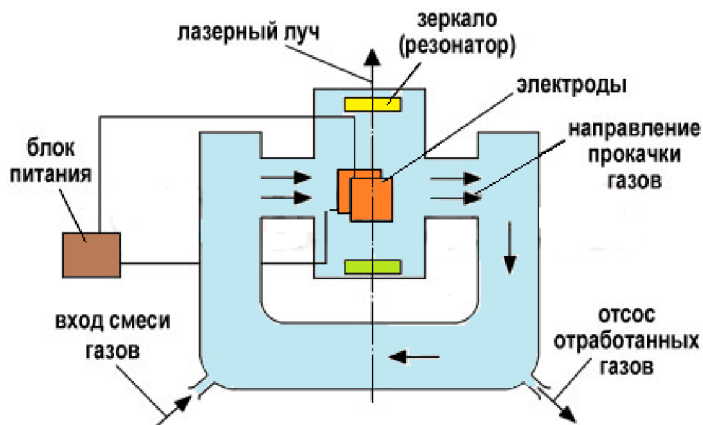


Рис. 26. Схема лазера с поперечной накачкой

Пары ионизируются, что приводит к рассеиванию и экранированию луча лазера. В связи с этим, при использовании лазеров большой мощности в зону сварки необходимо подавать, кроме защитного, так называемый плазмоподавляющий газ. В качестве плазмоподавляющего газа обычно используют гелий, который значительно легче аргона и не рассеивает луч лазера. Для упрощения процесса целесообразно применение смесей 50% Аг + 50% Не, которые выполняют плазмоподавляющую и защитную функции.

В этом случае сварочная горелка должна обеспечивать подачу газа таким образом, чтобы он сдувал ионизированный пар [13; 15; 85].

При лазерной сварке луч постепенно углубляется в деталь, оттесняя жидкий металл сварочной ванны на заднюю стенку кратера.

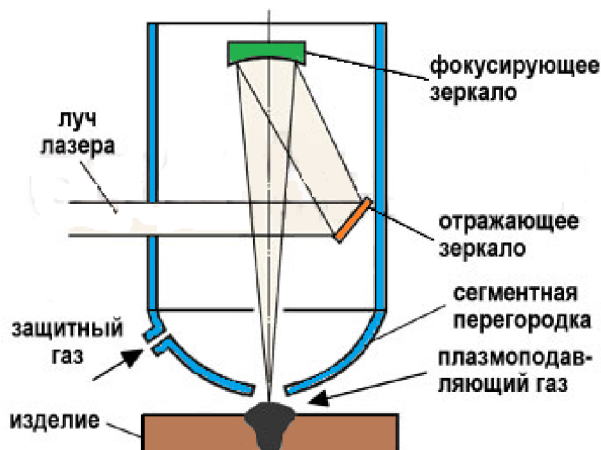


Рис. 27. Схема процесса лазерной сварки

Это позволяет получить «кинжальное» проплавление при большой глубине и малой ширине шва.

Высокая концентрация энергии в лазерном луче позволяет достигать высоких скоростей сварки, обеспечивая одновременно благоприятный термический цикл и высокую технологическую прочность металла шва.

Лазерная сварка осуществляется как в непрерывном, так и в импульсном режимах, обеспечивающих высокопроизводительный процесс соединения различных металлов толщиной от нескольких микрон до десятков миллиметров.

Для осуществления того или иного технологического процесса лазерной сварки необходимо определенное сочетание плотности мощности с длительностью воздействия излучения на материал. Возможны три основные группы сочетаний, охватывающий весь диапазон технологических режимов лазерной сварки.

1. Плотность мощности $E=10^5-10^6$ Вт/см², длительность воздействия $\tau > 10^{-2}$ с. В эту группу входят методы сварки непрерывным лазерным излучением. Возможна сварка всех конструкционных материалов в широком диапазоне толщин.

2. Плотность мощности $E=10^6-10^7$ Вт/см², длительность воздействия $\tau > 10^{-3}$ с. В эту группу входят методы сварки импульсно-периодическим лазерным излучением. Частота следования импульсов при этом составляет десятки и сотни герц, а их длительность существенно меньше по времени. Однако суммарное действие серии импульсов по времени должно быть достаточным для получения глубокого проплавления. Подобные режимы обеспечивают меньшие энергозатраты, чем при непрерывном излучении.

3. Плотность мощности $E = 10^5-10^6$ Вт/см², длительность воздействия $10^{-3} \leq \tau \leq 10^{-2}$ с. Подобные условия создаются отдельными импульсами с длительностью в указанном диапазоне. Формируется точечное сварное соединение. Сочетание плотности мощности и времени

воздействия из указанного диапазона обеспечивает проплавление малых толщин менее 1 мм.

Лазерную сварку по технологическим признакам можно разделить на две основные группы: на сварку малых толщин и сварку с глубоким проплавлением [13; 85].

К первой группе относятся способы, используемые для сварки материалов малых толщин, т.е. толщин до 1 мм. Принципиальным отличием этих способов является сварка при режимах, обеспечивающих только плавление материала без его интенсивного испарения. В этом случае применяют как непрерывный, так и импульсный режим излучения. Характерной особенностью сварного соединения, выполненного импульсной лазерной сваркой, является малое сечение шва, т.е. малый размер литой зоны. В сочетании с кратковременностью воздействия импульса это приводит к высоким скоростям охлаждения шва и околошовной зоны. Скорость охлаждения в литой зоне достигает 10^5 – 10^6 К/с, что вызывает образование мелкодисперсных и дендритных структур. Размеры зоны термического влияния незначительны и обычно не превышают 100–150 мкм. Структура металла в этой зоне неоднородна. Введение в сварочную ванну присадочного материала позволяет в широких пределах изменить химический состав металла шва и тем самым регулировать его структуру и свойства.

Импульсный режим осуществляется в основном твердотельными лазерами с энергией излучения от нескольких единиц до десятков джоулей. Материалы малых толщин можно сваривать непрерывными швами и отдельными точками. Шов в данном случае формируется как перекрытие отдельных точек, его сплошность зависит от степени перекрытия. Применяется как автоматическая, так и ручная сварка.

Наиболее распространена лазерная сварка импульсным излучением в электронной и электрохимической промышленности.

Ко второй группе относится сварка с глубоким проплавлением, т.е. сварка материалов толщиной более 1 мм. Процесс можно проводить как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме излучения лазера.

При сварке мощными концентрированными источниками энергии, такими как лазерный или электронный луч, формируется так называемое «кинжальное» проплавление, обеспечивающее большую глубину при малой ширине шва.

При лазерном излучении плотностью мощности выше критической осуществляется нагрев материала со скоростью, превышающей скорость отвода теплоты за счет теплопроводности. При этом происходят процессы локального плавления и испарения материала. Вследствие этого формируется углубление на поверхности, которое при достаточной мощности источника развивается по глубине, что приводит к образованию парогазового канала, заполненного парами материалов и окруженного жидким металлом.

Схема сварочной ванны при лазерной сварке представлена на рис. 28.

Давление паров материала оказывается достаточным для поддержания канала, и полость канала не заполняется жидким металлом под действием гидростатического давления и сил поверхностного натяжения.

При соответствующей скорости сварки форма канала приобретает динамическую устойчивость. На передней стенке канала происходит плавление материала, а на задней – затвердевание. Наличие канала способствует поглощению лазерного излучения в глубине материала, а не только на его поверхности. При этом образуется узкий шов с большим отношением глубины проплавления к ширине шва.

При образовании канала над поверхностью материала появляется светящийся факел, состоящий из продуктов испарения и выброса, а также частиц конденсированного пара. В условиях атмосферного давления на проплавлении сказывается состав газа, что учитывается при выборе защитного газа для лазерной сварки. Практически во всех случаях лазерная сварка выполняется с защитой шва от окисления.

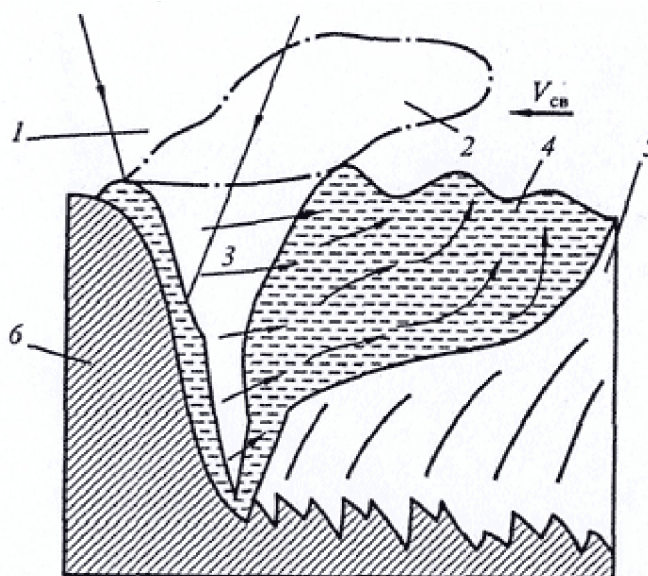


Рис. 28. Схема сварочной ванны при лазерной сварке: 1 – лазерный луч; 2 – плазменный факел; 3 – парогазовый канал; 4 – хвостовая часть ванны; 5 – металл шва; 6 – свариваемый металл

Качество защиты в значительной мере влияет на свойства сварных соединений [86].

В зависимости от конструкции свариваемых деталей, технологических требований и ряда других факторов возможно проведение сварки со сквозным проплавлением и без сквозного проплавления. Сквозное проплавление находит более широкое применение при сварке листовых нагруженных конструкций, а несквозное проплавление часто используют для герметизации или для соединения тонких деталей с массивными. Сварка возможна во всех пространственных положениях. Особенности технологии, связанные с большой скоростью процесса, прецизионностью и рядом других факторов, обуславливают возможность осуществления лазерной сварки с глубоким проплавлением только в автоматическом режиме.

К основным преимуществам лазерной сварки относятся:

- высокая производительность процесса, которая определяется скоростью его проведения. Сварка непрерывным излучением обладает исключительно большими скоростями – 10–11 м/мин.;

- экономия материала;

- универсальность луча лазера в том, что его можно применять для ведения различных технологических процессов – резки, сварки, термообработки и т.д.;

- локальность обработки в пространстве и во времени;

- прецизионность обработки;

- корпоративное свойство луча лазера проявляется в эффективной интеграции с различными технологическими процессами – дуговыми, плазменными, индукционными, световыми и т.д.;

- высокая пространственная разрешающая способность воздействия на материал, обеспечивающая формирование структур или изучение функциональных элементов с геометрическими размерами применительно к решению задач микротехнологии и нанотехнологии [12–15].

Несмотря на многие технико-экономические преимущества лазерных технологий, их широкое внедрение в машиностроительных отраслях до последнего времени ограничивалось рядом значительных технико-эксплуатационных недостатков:

- низким значением КПД, составляющим для твердотельных стержневых лазеров с ламповой накачкой 2–5% и для газовых СО₂-лазеров 8–12%;

- низкой надежностью и ресурсом работы лазерного технологического оборудования;

- высокой стоимостью лазерных технологических комплексов, большими эксплуатационными расходами;

- сложностью обслуживания лазерного технологического оборудования;

- значительные массогабаритные размеры и высокое энергопотребление затрудняло интеграцию лазерного технологического оборудования в технологические линии цехов, особенно связанных с серийным выпуском продукции.

Однако ситуация коренным образом изменилась в результате разработки и серийного выпуска нового поколения твердотельных лазеров – дисковых, волоконных и диодных с непрерывной выходной мощностью до 50 кВт с КПД до 40%, благодаря чему их эксплуатационные расходы на энергопотребление и охлаждение оказались в 3–5 раз меньше, чем у CO₂-лазеров и примерно в 20–50 раз меньше, чем у стержневых лазеров с ламповой накачкой.

Дисковые, волоконные, диодные лазеры, оснащенные оптоволоконными системами доставки луча лазера в рабочую зону обработки, имеющие небольшие массогабаритные показатели и низкое энергопотребление, открыли новую технологическую страницу развития и внедрения лазерных технологий в машиностроении и родственных ей отраслях промышленности. Отсутствие у этого класса лазеров юстируемых узлов, а также расходных материалов при эксплуатации, обеспечило высокую надежность их работы и значительно снизило эксплуатационные расходы.

Эффективность процесса лазерной сварки определяется эффективным коэффициентом полезного действия технологического процесса.

Эффективный коэффициент полезного действия – $\eta_{\text{эфф}}$ процесса лазерной сварки в первую очередь зависит от коэффициента поглощения энергии луча лазера обрабатываемого материала.

Коэффициент поглощения энергии луча лазера зависит от длины волны лазерного излучения – λ , чем меньше длина волны, тем выше коэффициент поглощения. Для CO_2 -лазеров длина волны равна 10,6 мкм, дисковых, диодных и волоконных лазеров равна $\lambda = 1,04\text{--}1,06$ мкм.

Оценка энергетической эффективности процесса лазерной сварки определяется как произведение КПД лазера «от розетки» на $\eta_{\text{эфф}}$.

Основным недостатком процесса сварки CO_2 -лазерами является низкая энергетическая эффективность. Для CO_2 -лазера энергетический КПД составляет примерно 10% от розетки, а коэффициент поглощения лазерного излучения металлами не превосходит нескольких процентов, так что полный КПД процесса сварки составляет доли процента.

Для дисковых, волоконных, диодных лазеров коэффициент поглощения может достигать значений 10–15%, при полном КПД самого лазера до 25%.

Сравнительный анализ эффективности сварки CO_2 -лазером, дисковым и волоконным лазерами показывает, что эффективность сварки дисковым лазером в несколько раз превышает эффективность сварки CO_2 -лазером [87].

Высокий КПД лазеров делает применение лазерной сварки в производстве чрезвычайно конкурентно способным способом сварки и экономически эффективным. Кроме того применение лазерной технологии не приводит к увеличению производственного травматизма и профзаболеваний.

Наряду с преимуществами существуют некоторые недостатки, затрудняющие применение лазерной сварки. Это высокая стоимость лазерного оборудования и оснастки, а также сложность устройств лазерной техники, что требует высокого уровня технической подготовки обслуживающего персонала.

Глава третья

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА

3.1. Прямолинейные пружинно-витые каналы

Интенсификация процессов теплообмена тесно связана с вопросом создания высокоэффективных теплообменных элементов. Этой проблеме посвящено значительное число работ [4; 48; 116; 117]. Согласно современным представлениям теплообменную поверхность таких элементов целесообразно формировать в виде винтообразных впадин и выступов, что приводит к закрутке потока, и как следствие к интенсификации процессов теплообмена.

Кроме того, закрутка потока в таких каналах позволяет уменьшить солеотложения на внутренних поверхностях [116; 117]. При этом считается установленным [118] факт асимптотического приближения к своему постоянному значению с течением времени термического сопротивления слоя солеотложений, что не наблюдается на внутренних поверхностях гладких круглых труб. Также показано [118], интенсификация теплообмена в каналах с турбулизаторами потока позволяет уменьшить минеральные отложения на внутренней поверхности примерно в пять раз по сравнению с гладкими трубами.

В связи с этим представляет практический интерес, разработанный в последнее время, класс пружинно-витых каналов [116], витки которых выполнены из проволоки различного поперечного сечения и жестко скреплены лазерной сваркой [16; 90; 92–95; 116–121].

На рис. 29 представлен пружинно-витой канал, выполненный из проволоки круглого сечения.

При такой технологии исключается явление наклепа, имеющего место в трубах с накаткой.

Процесс образования таких каналов может быть реализован путем плотной намотки проволоки эллиптического или круглого сечений на подложку в виде круглого или эллиптического цилиндра.

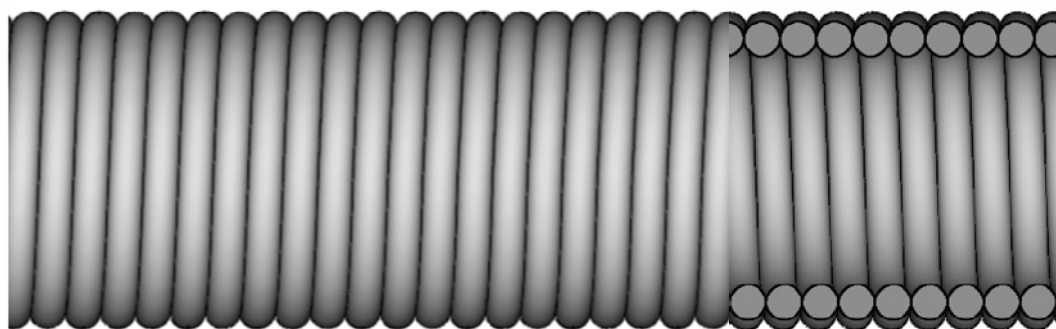


Рис. 29. Пружинно-витой канал

За счет эллиптической формы проточной части при движении жидкости происходит перераспределение радиальных давлений по осям эллипса, что вызывает появление циркуляционных токов, перемешивающих среду в канале. Это интенсифицирует процесс теплообмена и приводит к тепловой стабилизации на более коротком участке.

Наличие спиральных выступов на наружной поверхности пружинно-витого канала выполняет роль внешнего оребрения, увеличивая площадь теплообменной поверхности в 1,5–1,7 раза. Такая поверхность способствует интенсификации теплообмена при умеренном росте потерь энергии на прокачивание теплоносителя.

Однако в процессе исследований [116] был отмечен процесс затухания циркуляционных токов в канале. В этой связи в работе [116] было предложено установить в проточной части теплообменного элемента 1 (рис. 30) интенсификаторы 2, выполненные в виде спиральных пружинно-витых элементов, жестко закрепленных между витками тугой пружины.

Спиральные пружинно-витые интенсификаторы 2 выполнены из элементов прямоугольного сечения и выполняют, кроме того, роль внутреннего оребрения.

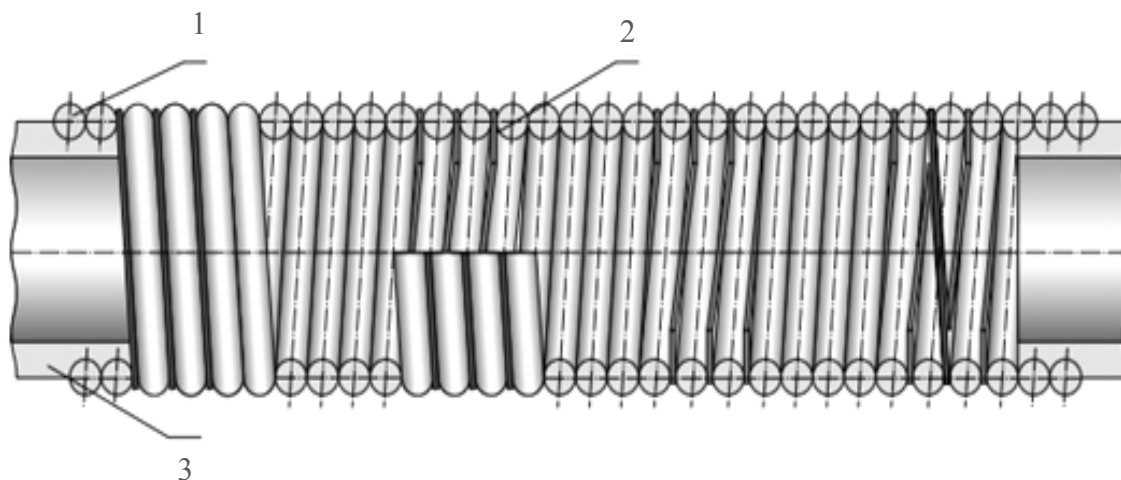


Рис. 30. Теплообменный элемент с пружинным интенсификатором:
1 – теплообменный элемент; 2 – интенсификатор; 3 – патрубок

Концы такого теплообменного элемента снабжены патрубками 3 для последующей их развальцовки в трубных плитах кожухотрубных теплообменников. Пружинно-витые интенсификаторы 2 устанавливают путем ввинчивания их в зазоры между витками растянутого пружинно-витого теплообменного элемента 1 с последующим их жестким креплением лазерной сваркой между витками элемента 1.

При движении рабочей среды в проточной части теплообменного элемента, с установленными в нем интенсификаторами, пристенным слоям жидкости в проточной части канала сообщается местная закрутка потока, в котором зарождаются вторичные течения (макровихри) с турбулентными флуктуациями в виде вихрей Тейлора-Гёртлера.

Для дальнейшего увеличения эффективности теплообмена предложено также устанавливать в проточной части канала непрерывные спиральные интенсификаторы с отштампованными лепестками, отогнутыми по направлению закрутки потока.

На рис. 31 представлен теплообменный элемент с непрерывным спиральным интенсификатором, а на рис. 32 фрагмент непрерывного спирального интенсификатора.



Рис. 31. Непрерывный спиральный интенсификатор

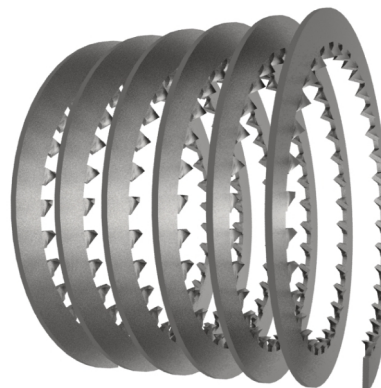


Рис. 32. Фрагмент непрерывного спирального интенсификатора

В работе [116] предложено проточную часть пружинно-витой трубы выполнить в виде чередующихся с заданным шагом выступов 1 и лысок 2 (рис. 33).

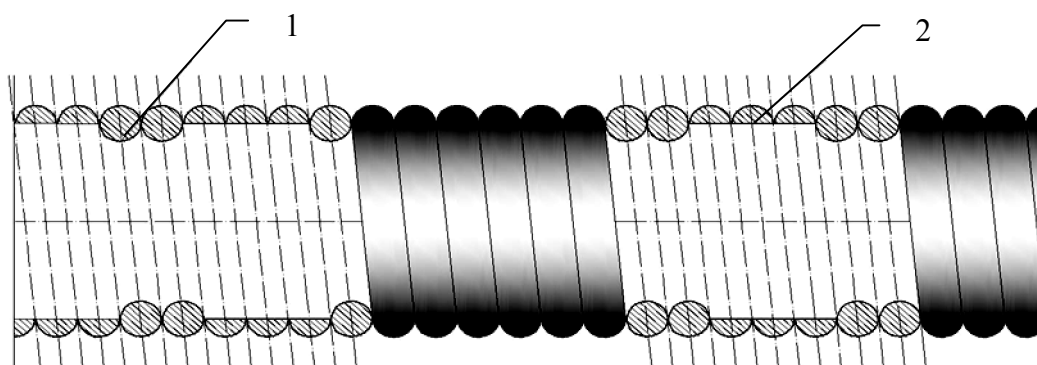


Рис.33. Теплообменный элемент с выступами и лысками:
1 – выступ; 2 – лыска

Сочетание зон выступов и лысок способствует быстрому выравниванию поля температур в проточной части трубы и обеспечивает высокую эффективность теплообмена.

Дальнейшим развитием идеи использования пружинно-витых каналов и целей повышения их теплогидродинамической эффективности были предложены конструкции труб типа «конфузор-диффузор» (рис. 34).

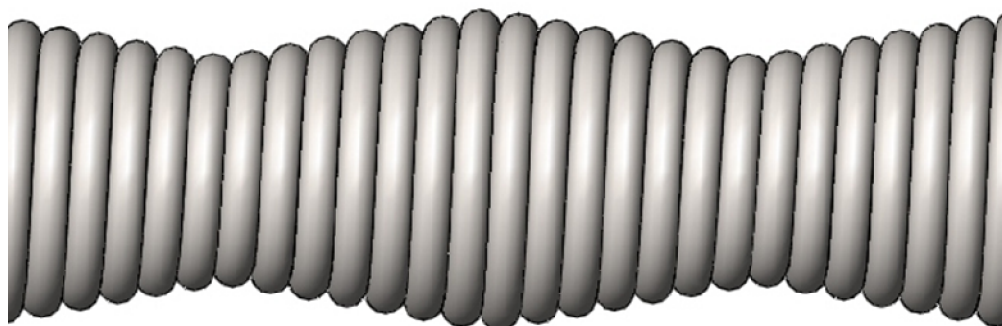


Рис. 34. Пружинно-витой канал типа «конфузор-диффузор»

Интенсификация теплообмена в таких каналах обусловлена особенностями гидродинамики потока под действием знакопеременного градиента давления. Турбулентные вихреобразования, генерируемые в диффузорных элементах и отрывной зоной кромки стыка с конфузором, уносятся потоком и полезно используются в конфузорных элементах.

В конфузорных элементах используется также эффект увеличения скоростей пристенных слоев жидкости.

Использование каналов конфузорно-диффузорного типа является одним из новых и перспективных способов интенсификации конвективного теплообмена, основанных на организации течения теплоносителя под действием различных неоднородностей давления [117]. При этом развитие поверхности используется не только для простого увеличения теплового потока, но главным образом для создания в потоке благоприятной гидродинамической обстановки, способствующей интенсификации теплообмена.

В работе [123–126] предлагается выполнить проточную часть пружинно-витого теплообменного элемента на конус (рис. 35).

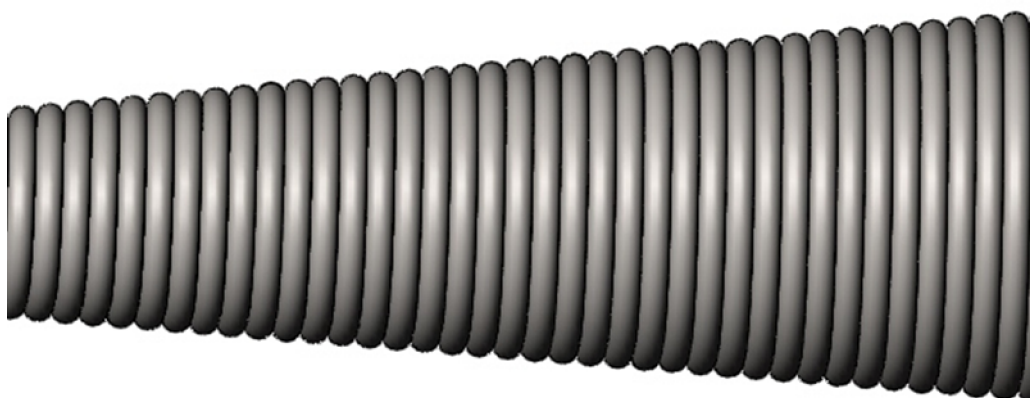


Рис. 35. Пружинно-витой канал, выполненный на конус

Конфигурация теплообменного элемента, выполненного на конус, позволит существенно интенсифицировать процесс теплообмена за счет вторичных течений, возникающих под действием центробежных сил и эффекта центрифугирования «холодных» объемов жидкости на оси теплообменного элемента к периферии (внутренней стенке).

Кроме того, при постоянном расходе нагреваемой жидкости, за счет изменения поперечного сечения теплообменного элемента, растет средняя скорость жидкости в канале. Это вызывает рост турбулентности в проточной части элемента, способствуя перемешиванию жидкости — горячих слоев у стенки с «холодной» частью потока в центральной части теплообменного элемента.

Следует также отметить, что при движении жидкости в конической части теплообменного элемента возрастает влияние центробежной силы на элементы вращающейся жидкости, вызывая поперечную циркуляцию среды в проточной части конического теплообменного элемента.

3.2. Змеевиковый пружинно-витой канал

В целях снижения металлоемкости и интенсификации теплообмена в последующем на базе пружинно-витых каналов были предложены ряд инновационных змеевиковых теплообменных элементов, один из которых представлен на рис. 36.

Интенсификация теплообменных процессов в изогнутых трубах-змеевиках [127–146] в основном вызвана поперечной циркуляцией среды в проточной части криволинейных каналов [127–131].

Согласно данным [131], увеличение коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме течения в искривленной трубе в 1,3 раза выше, но вызывает рост энергетических затрат при движении жидкости за счет искривления трубы в 1,37 раза. Такая же интенсификация теплообмена за счет увеличения скорости жидкости в прямой трубе приводит к увеличению энергетических затрат в 1,76 раза.

В связи с этим, применение винтовых змеевиков, в целях интенсификации теплообмена, является целесообразным [131; 140; 141].



Рис. 36. Змеевиковый теплообменный элемент на базе пружинно-витого канала

3.3. Оценка степени развития поверхности

Важным направлением решения задач ресурсо- и энергосбережения является разработка и внедрение новых видов развитых конвективных поверхностей теплообмена, отличающихся высокой теплогидродинамической эффективностью, технологичностью и невысокой стоимостью.

Внедрение эффективных и дешевых теплообменников с трубными пучками, выполненными в виде интенсифицированных теплообменных труб, приведет к существенной экономии материальных и энергетических ресурсов.

Улучшение теплогидродинамических характеристик поверхностей нагрева возможно несколькими способами [116], одним из которых является развитие внутренней и наружной поверхностей труб радиальным вдавливанием участков стенки трубы с образованием впадин и выступов различного профиля (рис. 37).

Это позволяет получить существенное развитие поверхностей, омываемых теплоносителями внутри и снаружи, а также интенсифицировать теплообмен за счет турбулизации потоков в выемках и впадинах [4; 116].

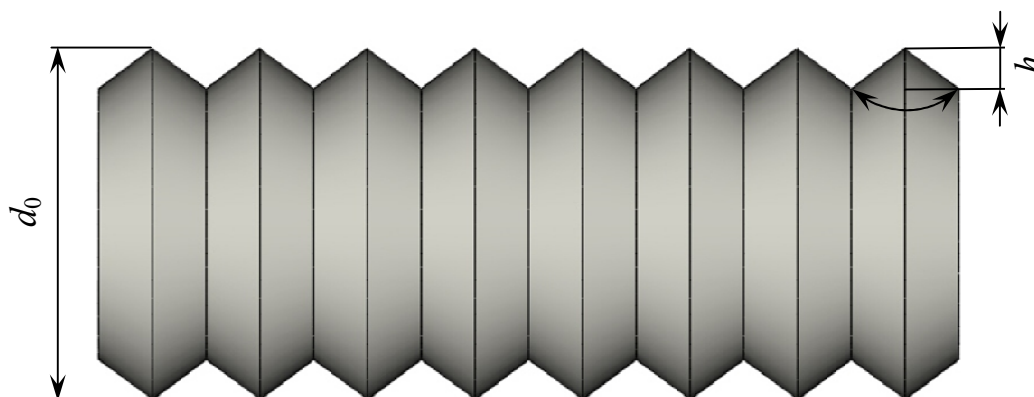


Рис. 37. Поверхность с треугольными кольцевыми впадинами и выступами

Если представить приближенно профиль поверхности как последовательность треугольных выступов, впадин и пренебречь толщиной оболочки, то несложный геометрический анализ показывает, что степень развития поверхности канала $\psi = F_1/F_0$ зависит от угла при вершине треугольного выступа β ($0 < \beta < \pi$) и его высоты h :

$$\psi = \frac{F_1}{F_0} = \frac{1}{\sin(\beta/2)} \left(1 - \frac{h}{d_0} \right), \quad (3.1)$$

где F_1 – площадь поверхности трубы с треугольными выступами и впадинами; F_0 – площадь поверхности гладкой круглой трубы.

Функция $y = \frac{1}{\sin(\beta/2)}$ минимальна (равна 1) при $\beta = \pi$ и стремится к бесконечности при $\beta \rightarrow 0$. За счет уменьшения угла β можно получить существенное увеличение теплообменной поверхности. Так, если взять профиль выступа в виде равнобедренного треугольника с прямым углом при вершине $\beta = \pi/2$, то степень развития поверхности составит:

$$\psi = \sqrt{2} \left(1 - \frac{h}{d_0} \right). \quad (3.2)$$

Отсюда следует, что максимальная (предельная) степень развития поверхности, равная $\psi_{\text{limit}} = \sqrt{2}$, достигается при величине $h \rightarrow 0$, когда число выступов на единице длины трубы стремится к бесконечности. Если взять за основу равносторонний треугольник ($\beta = \pi/3$), то формула (3.1) приобретает вид: $\psi = 2 \left(1 - \frac{h}{d_0} \right)$ и $\psi_{\text{limit}} = 2$.

Получить степень развития поверхности $\psi > 2$ возможно за счет дальнейшего уменьшения угла β . Тогда профиль наружной и внутренней поверхностей соответствует профилю поперечно-оребренной трубы, где значительно ухудшаются условия теплообмена на внутренней и внешней

поверхностях, что указывает на нецелесообразность бесконечного снижения значений угла β [116].

Если представить профиль поверхности как последовательность полукруглых выступов и впадин (рис. 38) и пренебречь толщиной оболочки, то можно показать, что степень развития поверхности канала ψ зависит только от диаметра полукруглого выступа:

$$\psi = \frac{F_2}{F_0} = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{d}{d_0} \right),$$

где F_2 – площадь поверхности трубы с полукруглыми выступами и впадинами.

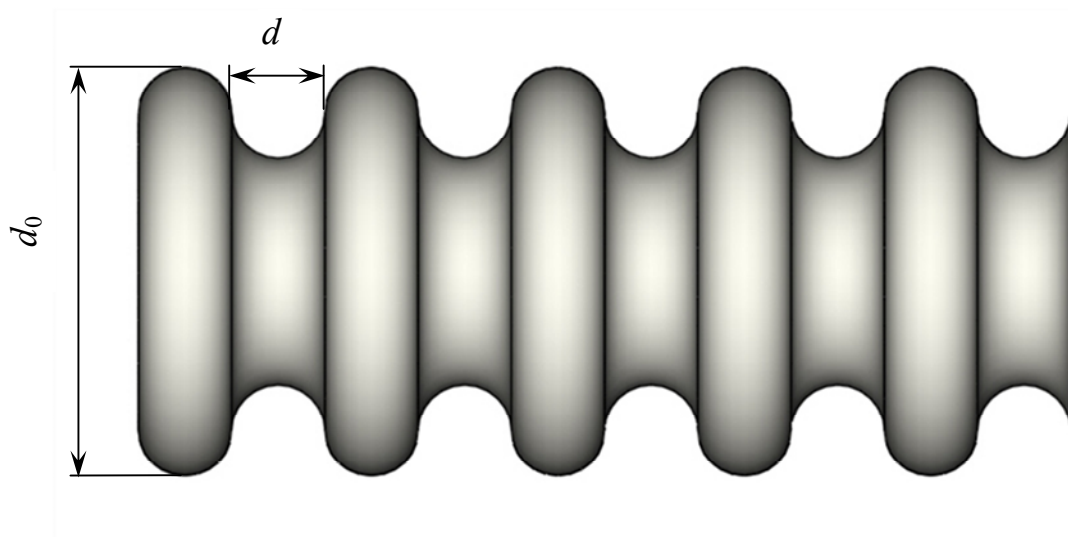


Рис. 38. Поверхность с кольцевыми впадинами и выступами

В этом случае максимальная степень развития поверхности, равная $\psi_{\text{limit}} = \pi/2$, достигается при $d \rightarrow 0$, когда число выступов на единице длины трубы стремится к бесконечности. Любое заметное ($\psi > 1,15$) двухстороннее развитие поверхности целесообразно, так как прямым образом влияет на увеличение передаваемого теплового потока и обеспечивает соответствующее снижение металлоемкости теплообменника [116].

В целях улучшения внутренней гидродинамической обстановки целесообразно формировать поверхности теплообмена в виде винтообразных впадин и выступов, что приведет к закрутке потока внутри трубы, и как следствие, к интенсификации теплообмена (рис. 39).

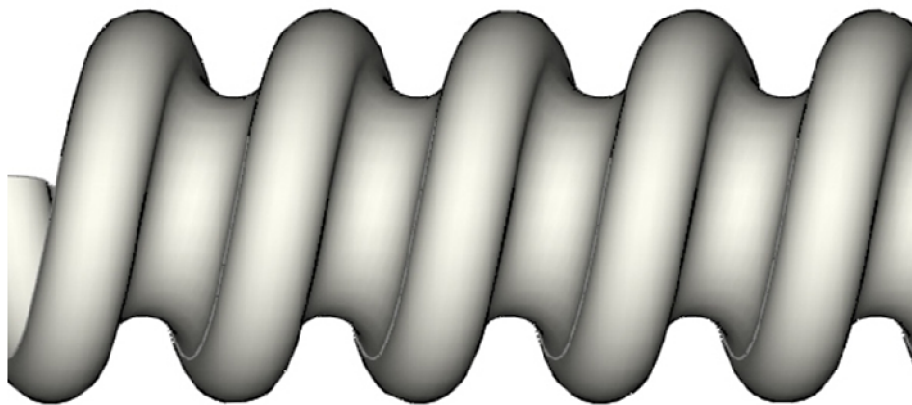


Рис. 39. Поверхность с винтовыми канавками

Заметим также, что закрутка потока позволяет уменьшить солеотложения на внутренних поверхностях. В работах Г.А. Дрейцера, Б.В. Дзюбенко и ряда других отечественных и зарубежных авторов [116] показано, что с течением времени термическое сопротивление слоя солеотложения внутри этих труб асимптотически приближается к своему постоянному значению, что не наблюдается на внутренних поверхностях гладких круглых труб. Установлено также [118; 168; 169], что интенсификация теплообмена в трубах позволяет уменьшить минеральные отложения на внутренней поверхности примерно в пять раз по сравнению с гладкими круглыми трубами.

Степень развития поверхностей ψ пружинно-витых каналов определяется выражениями (3.1) и (3.2).

В отличие от цилиндрических каналов конфигурация пружинно-витых труб обеспечивает снижение металлоемкости по сравнению с гладким каналом в среднем на 27%. Действительно, отношение массы

материала, требуемого для изготовления труб одинаковой длины, равно отношению площадей поперечных сечений этих каналов.

Так, например, для пружинно-витого канала, выполненного из проволоки круглого сечения, это отношение равно:

$$\zeta = \frac{M_0}{M_{\text{spring}}} = \frac{S_0}{S_{\text{spring}}} = \frac{4d^2}{\pi d^2} = \frac{4}{\pi} = 1,27,$$

где M_0 – масса гладкой трубы; M_{spring} – масса пружинно-витого канала, выполненного из проволоки круглого сечения; S_0 – площадь поперечного сечения стенки гладкой трубы; S_{spring} – площадь поперечного сечения пружинно-витого канала.

Таким образом, рассмотренные выше пружинно-витые каналы качественно отличаются от известных аналогов профилированных труб, например, труб с накаткой, и имеют ряд существенных преимуществ [117]:

- наличие спиральных выступов на поверхностях теплообмена пружинно-витой трубы обеспечивает двустороннюю интенсификацию процессов теплопередачи и увеличивает площадь теплообменной поверхности по сравнению с гладкой трубой в среднем в 1,5–1,7 раза;

- технология изготовления канала путем навивки исключает явление наклепа, имеющего место в технологии накатки;

- металлоемкость конструкций снижается как минимум на 27%;

- снижается скорость солеотложения на стенках канала, так как периодическое обновление пограничного слоя препятствует осаждению загрязнений внутри элементов.

Глава четвертая ЗМЕЕВИКОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ

4.1. Конструкции современных змеевиковых теплообменников

Отдельный класс теплообменных аппаратов составляют змеевиковые теплообменники [4]. К змеевиковому классу аппаратов относятся: витые [5] и погружные теплообменники с цилиндрическими змеевиками и змеевиками из прямых труб [5]. Поверхность нагрева витых аппаратов komponуется из ряда концентрических змеевиков, заключенных в кожух и закрепленных в соответствующих головках (рис. 40).



Рис. 40. Змеевиковый теплообменник с витыми трубами

По форме теплообменных элементов змеевиковые аппараты также подразделяются на винтовые и зигзагообразные [2; 3]. Первые представляют собой змеевик, согнутый из трубы по форме винтовой пружины. Его устанавливают внутри аппарата или приваривают к наружной поверхности корпуса [46; 147; 148]. В последнем случае змеевики могут быть изготовлены из полутруб и уголков. Обычно змеевик погружен в сосуд с жидкой рабочей средой. Другая жидкость или газообразная среда под давлением пропускается по трубам.

Витые теплообменники широко применяются в аппарате высокого давления для процессов разделения газовых смесей методом глубокого охлаждения. Эти теплообменники характеризуются способностью к самокомпенсации, достаточной для восприятия деформации от температурных напряжений.

Погружные кожухотрубные змеевиковые теплообменники [2; 5] состоят или из цилиндрического змеевика [46; 149], или пучка круглых змеевиковых труб [2–5; 149], иногда труб типа «конфузор-диффузор» [117; 150–155], или пружинно-витых каналов [90; 92–95; 101; 110; 116; 156–158], погруженных в цилиндрический корпус с жидким теплоносителем. Теплообменники змеевикового типа могут быть выполнены из прямых труб, соединенных калачами [46; 148].

По змеевикам проходит жидкость, газ или пар. Аппараты этого типа применяются в качестве нагревателей и испарителей для жидкостей, холодильников для газов и жидкостей, а также конденсаторов [2; 3; 5]. В холодильниках для жидкостей вода может находиться как в змеевике, так и снаружи его. Коэффициент теплопередачи в змеевиках не велик, так как жидкость снаружи змеевика движется с малой скоростью или вовсе не движется. Часто и внутри трубок скорость движения рабочего тела не велика. Для интенсификации процесса теплообмена применяются мешалки [2] или змеевик помещают в кольцевое пространство между двумя сосудами [148; 149].

При конденсирующемся паре жидкость выгоднее пропускать через змеевик, а пар снаружи. Жидкость поступает в змеевик снизу-вверх и движется в нем со скоростью до 2 м/с, а пар со скоростью до 50 м/с входит в верхнюю часть корпуса и выходит снизу. Разность давлений теплоносителей в змеевиковых аппаратах может достигать 10 МПа.

Диаметр змеевика принимается $D_{зм}=200\text{--}2000$ мм, а диаметр труб $d=20\text{--}75$ мм [148].

Погружные теплообменники целесообразно использовать, когда жидкая рабочая среда находится в состоянии кипения или имеет механические включения, а также при необходимости применения поверхности нагрева из специальных материалов (свинец, керамика, стекло, фарфор), для которых форма змеевика наиболее приемлема [2; 3].

К достоинствам погружных теплообменников следует отнести [46; 148]:

- простота устройства и низкая стоимость изготовления;
- доступность наружной поверхности для очистки;
- возможность работать при больших давлениях внутри змеевика;
- из-за большого объема жидкости во внешнем кожухе они малочувствительны к изменению режима работы и перебоям в подаче воды.

В качестве недостатков отметим:

- небольшую поверхность нагрева до $10\text{--}15\text{ м}^2$;
- недоступность внутренней поверхности змеевика для очистки;
- громоздкость и низкий коэффициент теплоотдачи со стороны наружной поверхности змеевика.

Одна из распространенных конструкций змеевикового теплообменника [148] показана на рис. 41. Аппарат имеет корпус 1, в котором размещен змеевик 3 или система змеевиков. Витки змеевика ориентированы по винтовой линии. При большой площади поверхности теплообмена змеевики по длине набирают из нескольких секций. Во избежание прогибов труб при большом числе витков и большом диаметре навивки каждый виток закрепляют болтами на стойках. Пар вводится в верхнюю часть корпуса через вход $П_1$ со скоростью до 50 м/с, выходит

снизу через выход Π_2 . Нагреваемая жидкость поступает в змеевик снизу через вход B_1 и движется в нем со скоростью до 2 м/с, выходит через выход B_2 . Разность давлений теплоносителей в змеевиковых аппаратах может достигать 10 МПа.

Вследствие большого объема корпуса, в котором находится змеевик, скорость движения жидкости в корпусе незначительна [2; 46; 148], что обуславливает низкие значения коэффициентов теплоотдачи от наружной стенки змеевика к жидкости. Для его увеличения повышают скорость движения жидкости путем установки в корпусе аппарата, внутри змеевика, стакана. В этом случае жидкость движется по кольцевому пространству между стенками аппарата и стакана с повышенной скоростью (рис. 41).

Змеевиковые теплообменники используют так же, как и водоподогреватели [148]. Змеевиковый водоподогреватель (рис. 42) состоит из змеевика 1, расположенного в корпусе 2, и крышки 4, к которой прикреплен змеевик.

Обычно в кожухотрубных змеевиковых теплообменниках обтекание змеевика внешним теплоносителем осуществляется равномерно со всех сторон практически с одинаковой скоростью. Однако известно, что теплоотдача в криволинейном канале, каковым является змеевик, не одинакова по сечению канала вследствие воздействия инерционных сил, вызывающих вторичные течения.

В результате этого эффекта жидкость, протекающая через центральную часть канала и имеющая наибольший температурный напор по отношению к поверхности теплообмена, направляется к вогнутой стенке змеевика. На этом участке поверхности теплообмена температурный градиент имеет наибольшее значение, соответственно, наибольшей будет и интенсивность теплообмена.

По обратной причине теплообмен на выпуклой поверхности будет наименее интенсивен. Кроме того, при увеличении шага между витками змеевика кривизна оси трубы уменьшается, соответственно, уменьшается воздействие и инерционных сил на поток жидкости [5].

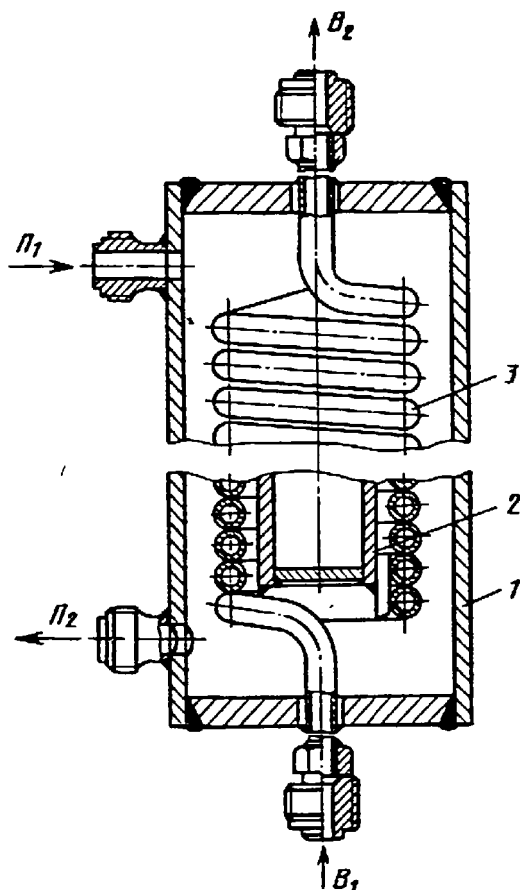
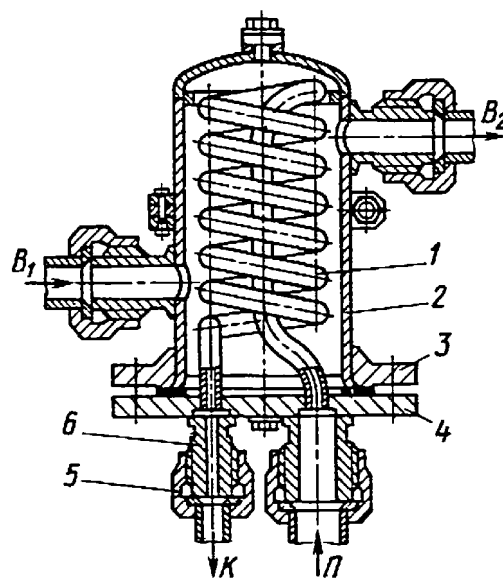


Рис. 41. Змеевиковый теплообменный аппарат с внутренним стаканом:
1 – корпус; 2 – стакан;
3 – змеевик из трубы



B_1 – вход воды;
 B_2 – выход воды;
 Π_1 – вход пара;
 Π_2 – выход конденсата

Рис. 42. Змеевиковый подогреватель:
1 – змеевик; 2 – корпус;
3 – фланец корпуса; 4 – крышка;
5 – накидная гайка; 6 – штуцер

Следовательно, для улучшения теплообмена следует стремиться к минимально возможному шагу между витками змеевика.

Для повышения эффективности теплообмена предложен змеевиковый парогенератор [90] (рис. 43), где предлагается организовать процесс с учетом разницы в интенсивности теплообмена по периметру витка змеевика.

Повысить эффективность теплообмена позволит прохождение большей части внешнего теплоносителя с наиболее активной, с точки зрения теплообмена, вогнутой стороны змеевика, где коэффициент теплоотдачи наибольший. Это достигается увеличением площади сечения продольного канала, сформированного между корпусом и змеевиком, по сравнению с площадью сечения канала между змеевиком и вставкой. Тем самым увеличивается количество внешнего теплоносителя, контактирующего с наиболее активной, с точки зрения теплообмена, поверхностью змеевика.

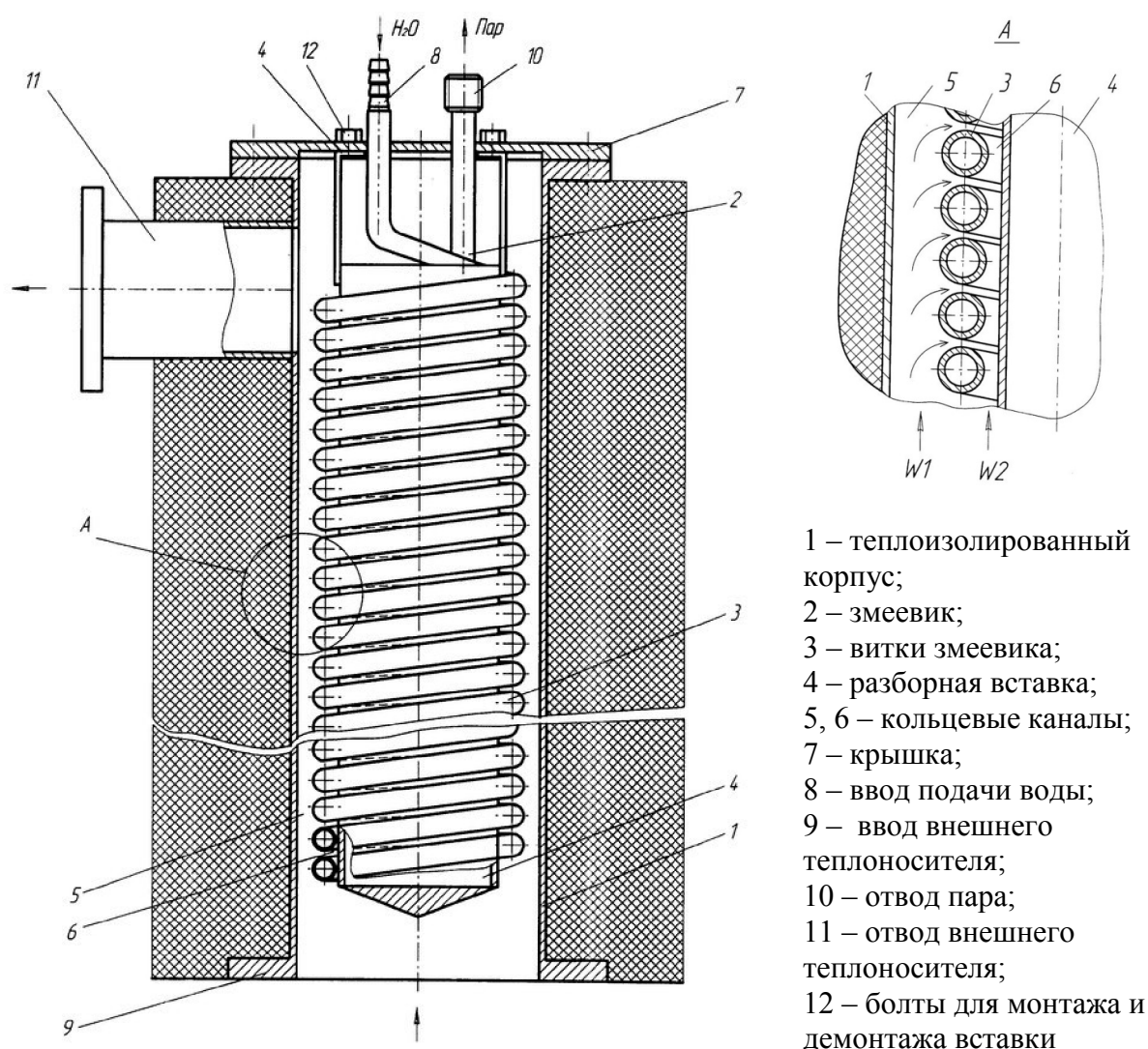


Рис. 43. Парогенератор

Дополнительному повышению эффективности теплообмена способствует профилированная геометрия внутренней поверхности корпуса, вызывающая разрушение пограничного слоя и турбулизацию потока внешнего теплоносителя.

Также интенсификации теплообмена способствует увеличение скорости обтекания внешним теплоносителем внутренней или выпуклой части поверхности змеевика, вследствие уменьшения площади сечения соответствующего продольного канала между вставкой и змеевиком. Гофрированный профиль стенки канала, сформированной витками змеевика, к тому же способствует образованию вихрей в области между соседними витками, их интенсивному перемешиванию и перемещению, что также интенсифицирует теплообмен с выпуклой части поверхности змеевика.

Минимально возможный шаг, формирующий зазоры между витками змеевика, способствует перетеканию части внешнего теплоносителя в направлении от корпуса к вставке и обратно, разрушая тем самым пограничный слой, перемешивая поток и интенсифицируя теплообмен. Для дополнительной интенсификации теплообмена наружную поверхность вставки, формирующей продольный кольцевой канал, можно выполнить также профилированной.

Парогенератор работает следующим образом. В змеевик 2 через ввод 8 в крышке 7 подается вода, а внешний теплоноситель через ввод 9 одновременно подается в продольные каналы между корпусом 1 и змеевиком 2, витками змеевика 3 и вставкой 4 в объеме W_1 и W_2 , соответственно. В результате взаимодействия теплоносителей вода в змеевике 2 нагревается, превращается в пар и отводится за пределы парогенератора через вывод 10, а охлажденный внешний теплоноситель отводится через вывод 11.

Типоразмер вставки 4 может меняться в зависимости от режима эксплуатации парогенератора. Для замены вставки 4 предусмотрена возможность ее демонтажа. Закрепление сменной вставки 4 на крышке 7 осуществляется при помощи болтов 12.

Змеевиковые теплообменники характеризуются хорошей способностью к самокомпенсации температурных напряжений и низким гидравлическим сопротивлением. Изменение диаметра навивки смежных витков способствует турбулизации потока среды на внешней стороне змеевиков. Однако сравнительно малые скорости отмыывания витков змеевика, обусловленные большой площадью живого сечения корпуса теплообменника с установленным внутри него змеевиком, не позволяют получить высоких коэффициентов теплоотдачи, малые массу и габариты теплообменника.

В целях интенсификации теплообмена, снижения массы и габаритов теплообменника в работе [159] предложен кожухотрубчатый змеевиковый теплообменник (рис. 44), содержащий корпус, во внутренней полости которого размещен вытеснитель с навитым на нем одно- или многозаходным змеевиком из труб, имеющих на внешней поверхности со стороны, обращенной к корпусу, рельеф в виде системы полусферических лунок, образующих на внутренней стенке труб плавно очерченные выступы, расположен с зазором относительно стенки корпуса, а на наружной стенке последнего выполнен рельеф в виде системы полусферических лунок, формирующих на его внутренней стенке плавно очерченные выступы, центры которых расположены по винтовой линии с шагом, равным шагу винтовой линии змеевика.

Наличие на стенках щелевых каналов полусферических выступов приводит к турбулизации потока, интенсификации теплообмена при умеренном росте гидравлического сопротивления каналов [90].

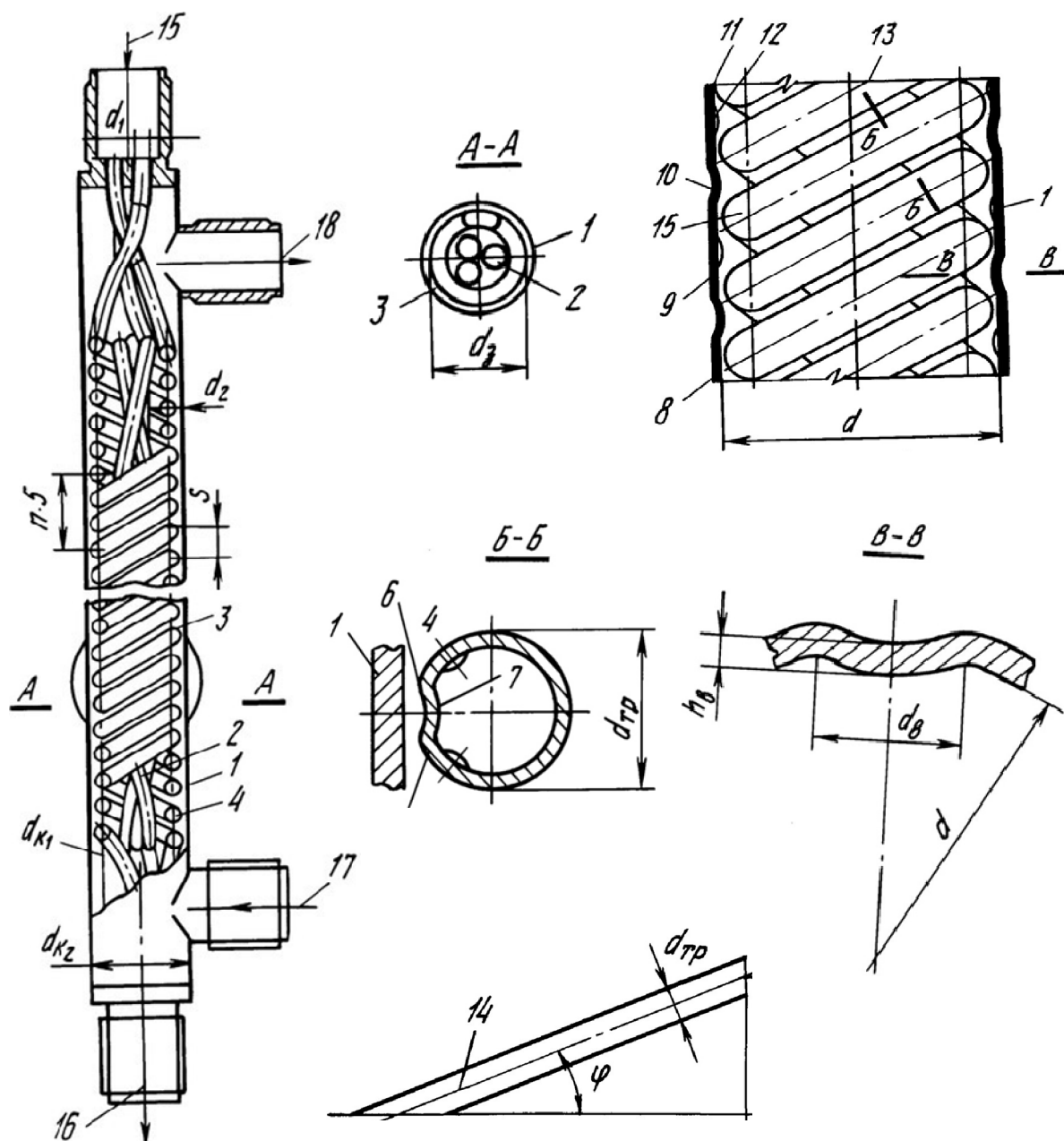


Рис. 44. Кожухотрубчатый змеевиковый теплообменник

Кожухотрубчатый змеевиковый теплообменник содержит корпус 1, во внутренней полости которого размещен вытеснитель 2 с навитым на нем одно- или многозаходным змеевиком 3 из труб 4, имеющих на внешней поверхности со стороны 5, обращенной к корпусу, рельеф в виде системы полусферических лунок 6, образующих на внутренней стенке труб плавно очерченные выступы 7, расположенным с зазором 8

относительно стенки корпуса, а на наружной стенке 9 последнего выполнен рельеф в виде полусферических лунок 10, формирующих на его внутренней стенке 11 плавно очерченные выступы 12, центры которых расположены по винтовой линии 13 с шагом, равным шагу винтовой линии 14 змеевика, диаметр основания которых на внутренней стенке корпуса меньше шага между витками 15 труб змеевика, а их высота меньше толщины зазора 8 между стенкой корпуса и змеевиком.

При работе теплообменника один теплоноситель (стрелка 15) поступает через входной патрубок в каналы труб 4 змеевика 3, закручивается, омывает поверхность плавно очерченных выступов 7 и через выпускной патрубок удаляется из теплообменника (стрелка 16).

Второй теплоноситель (стрелка 17) направляется внутрь корпуса 1, где теплоноситель распределяется на два потока, связанных друг с другом за счет перетечки теплоносителя через зазоры между витками 15 труб 4. Один поток движется во внутреннем канале змеевика, омывая поверхность вытеснителя 2 и внутреннюю стенку змеевика 3. Второй поток перемещается в кольцевом канале между стенкой корпуса (1) и наружной поверхностью змеевика 3, омывая плавно очерченные выступы 12 и стимулируя вихреобразование в лунках 6 на стенке змеевика. Вблизи выпускного патрубка потоки сливаются и через последний направляются к потребителю (стрелка 18).

Конструкция рассмотренного теплообменного аппарата громоздка и сложна в изготовлении.

Конструктивный расчет змеевиковых теплообменников включает определение общей длины, числа витков и высоты змеевика.

При круглых змеевиках [3] средняя длина трубы в змеевике

$$L = \pi Dn,$$

где D – диаметр змеевика; n – число витков змеевика.

Высота змеевика $H = nt$, где t – шаг по вертикали (берется от 1,5 до 2 диаметров трубы).

Обозначив $\varepsilon = \frac{H}{D}$, получим $\varepsilon = \frac{\pi n^2 t}{L}$, откуда [3]

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon L}{\pi t}}.$$

Отношение ε принимается равным 0,5...3.

Если число концентрических змеевиков равно m , а расстояние между змеевиками b , то диаметр змеевика D равен

$$D = D_1 + (m - 1)b.$$

Отсюда можно определить диаметр первого змеевика

$$D_1 = D - (m - 1)b.$$

Диаметр второго змеевика $D_2 = D_1 + 2b$, третьего $D_3 = D_2 + 2b = D_1 + 4b$ и последнего $D_m = D_1 + 2(m - 1)b$.

Расстояние от змеевика до нижней и верхней части кожуха принимается в пределах 100–300 мм [148].

Внутренний диаметр корпуса теплообменника, в который погружается змеевик, рекомендуется принимать в следующих пределах

$$D^* = D + (3...4)D_n,$$

где D_n – наружный диаметр трубы змеевика.

Определим размеры змеевиков погруженного теплообменника $F = 40 \text{ м}^2$ при концентрическом расположении змеевиков [3].

Змеевики выполнены из труб диаметром 38/33 мм. Количество воды, проходящей по змеевику $V = 15 \text{ м}^3/\text{ч}$, скорость воды $W = 0,8 \text{ м/с}$. Тогда, через один змеевик проходит $3000 \cdot 0,785 \cdot 0,332 \cdot 0,8 = 2,45 \text{ м}^3/\text{с}$ воды.

Количество змеевиков равно $m = \frac{15}{2,45} = 6 \text{ шт.}$

Средняя длина труб в каждом змеевике

$$L = \frac{40}{6 \cdot 3,14 \cdot 0,0355} = 60 \text{ м.}$$

Принимаем $\varepsilon = 1$ и шаг $t = 1,5 \cdot 3,8 = 57$ мм, тогда число витков в змеевике

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon L}{\pi t}} = \sqrt{\frac{1 \cdot 60}{3,14 \cdot 0,057}} = 18.$$

Средний диаметр змеевика

$$D = \frac{L}{\pi n} = \frac{60}{3,14 \cdot 18} = 1,06 \text{ м.}$$

Принимаем расстояние между витками $b = 80$ мм, находим диаметры змеевиков

$$D_1 = D - (m - 1)b = 1060 - 5 \cdot 80 = 660 \text{ мм;}$$

$$D_2 = 660 + 2 \cdot 80 = 820 \text{ мм;}$$

$$D_3 = 820 + 2 \cdot 80 = 980 \text{ мм;}$$

$$D_4 = 980 + 2 \cdot 80 = 1140 \text{ мм;}$$

$$D_5 = 1140 + 2 \cdot 80 = 1300 \text{ мм;}$$

$$D_6 = 1300 + 2 \cdot 80 = 1460 \text{ мм.}$$

Высота змеевиков $H = nt = 18 \cdot 57 = 1026$ мм.

В целях интенсификации процессов теплообмена, снижения массы и габаритов погружных змеевиковых теплообменников в последние годы предложена целая серия таких аппаратов [90; 159].

На рис. 45 представлен кожухотрубный змеевиковый теплообменник [160], состоящий из корпуса 1, внутри которого размещены трубные змеевики 2 с витками 3, образующими стенки продольных каналов, имеющих щелевые зазоры 4 между трубами смежных витков.

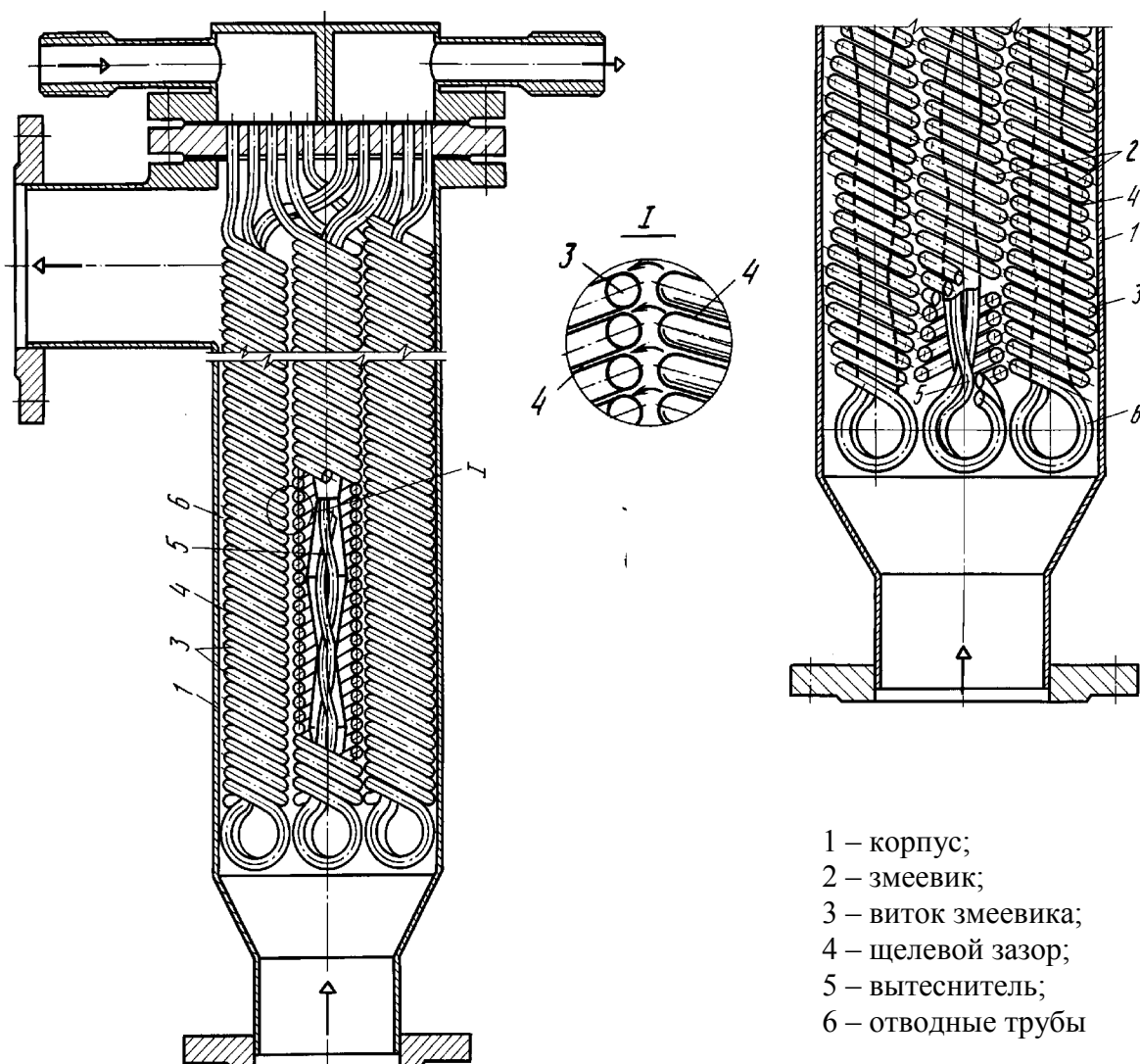


Рис. 45. Кожухотрубный змеевиковый теплообменник

Внутри каналов расположены коаксиальные гофрированные вытеснители 5, выполненные из полых конических элементов, а в полости вытеснителя расположены подводные и отводные трубы 6 змеевика.

Продольные каналы могут быть цилиндрическими, либо волнообразными с чередующимися диффузорными и конфузорными участками равной длины. Углы расширения диффузоров и сужения конфузоров выбирают из условия обеспечения высокой энергетической эффективности. Такой эффективностью, по мнению авторов, обладают каналы конфузорно-диффузорного типа с углами сужения (расширения)

меньше 10° . При угле сужения (расширения) равного $10\text{--}17^\circ$ резко возрастает гидравлическое сопротивление. При компоновке змеевиков в пучок диффузорные участки каждого канала располагают напротив конфузорных участков соседних каналов. Такая компоновка змеевиков в пучке под действием разности давлений на диффузорном и конфузорном участках соседних каналов обеспечивает поперечное перетекание теплоносителя через щелевые зазоры, между трубами интенсифицируя, тем самым, теплообмен.

К змеевиковым аппаратам относится и специальный тип теплообменников (рис. 46), змеевики в которых привариваются снаружи к корпусу реакционных аппаратов (рис. 47) или выполняются в виде спирально-змеевиковых каналов треугольного, квадратного, ромбического или полукруглого профиля путем механической обработки боковой поверхности стенки (рис. 48, 49).

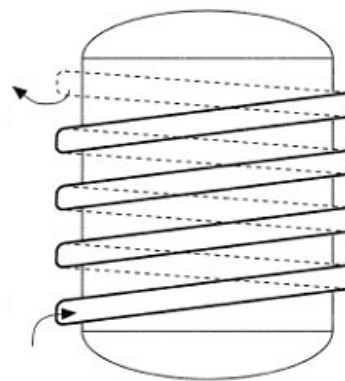
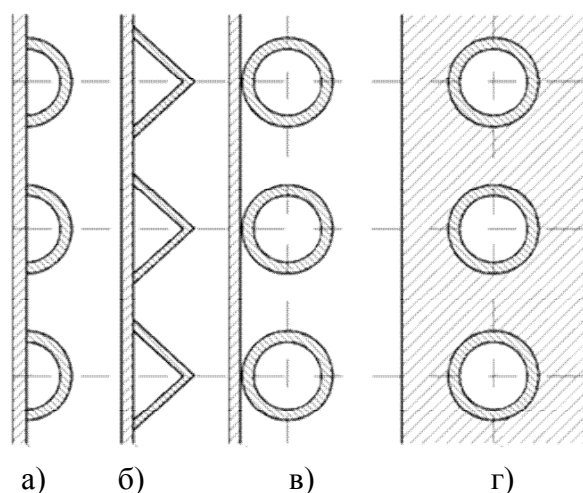


Рис. 46. Аппарат с внешним подогревом



- а) из разрезанных по образующей половинок труб;
- б) из угловой стали;
- в) из труб, приваренных многослойным швом;
- г) из труб, залитых в стенки аппаратов

Рис. 47. Варианты исполнения змеевиков

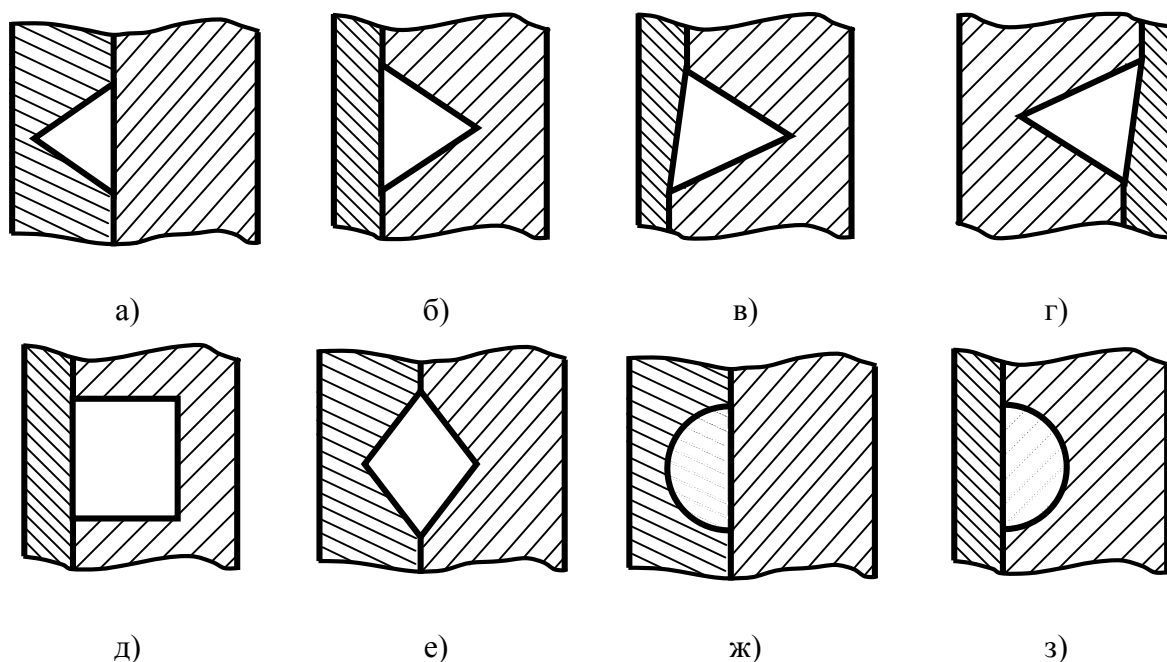


Рис. 48. Типы профилей змеевиковых каналов [115]

а) треугольное сечение $\varphi = 0^\circ$; б) треугольное сечение $\varphi = 180^\circ$;
 в) треугольное сечение $\varphi = 45^\circ$; г) треугольное сечение $\varphi = 135^\circ$; д) квадратное сечение;
 е) ромбическое сечение; ж) полукруглое сечение $\varphi = 0^\circ$; з) полукруглое сечение $\varphi = 180^\circ$



а)



б)

Рис. 49. Модернизированный охладитель газа
 мембранного компрессора ОАО «УКЗ»

со спирально-змеевиковой проточной частью треугольного сечения:
 а) труба со спирально-змеевиковыми каналами треугольного сечения;
 б) теплообменный аппарат в сборе

В табл. 1 приведены ориентированные значения коэффициентов теплоотдачи различных типов обогревающих стенок [2].

Таблица 1

Тип обогревающей стенки	К, Вт/м ² К	Максимальное давление нагревающего агента, МПа
Рубашки	800–1200	0,5–1
Аппарат со встроенным в стенку змеевиком	200–400	35
Аппарат с приваренным змеевиком	450–800	35
Аппарат с приваренными каналами	800–2200	6
Аппарат с двойными стенками	1100–2200	7,5

Коэффициент теплоотдачи от теплоносителя, протекающего в приваренном из цельной трубы змеевике, рассчитывается по формуле [143]:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25}.$$

С учетом поправки, а для полутрубы с учетом эквивалентного диаметра канала $d_{eq}=0,6d$.

Для расчета чисел Nu и коэффициентов сопротивления ξ , спирально-змеевикового канала с треугольным профилем проточной части, автором [147] предложены выражения

$$Nu = 1,1 \cdot 10^{-6} De^2 \left(\frac{d_{eq}}{D} \right)^{0,79} Pr^{0,3},$$

$$\xi = 8,5 De^{-0,714} \left(\frac{d_{eq}}{D} \right)^{0,67},$$

а для канала квадратной формы

$$Nu = 9,3 \cdot 10^{-4} De^{2,1} \left(\frac{d_{eq}}{D} \right)^{-0,84} Pr^{0,33},$$

$$\xi = 2,4 De^{-0,4} \left(\frac{d_{eq}}{D} \right)^{0,45}.$$

где d – диаметр цельной трубы; D – змеевика.

Критериальные уравнения справедливы при соотношении $0,05 < d_{eq} \cdot D < 0,164$, $8000 < d_{eq} \cdot Re < 100000$, критерий Дина $De = 3000-4000$.

Разновидностью змеевиковых аппаратов являются змеевиковые теплообменники типа «труба в трубе».

Одна из первых конструкций такого теплообменника описана в работе [161]. Аппарат (рис. 50) содержит установленные с зазором наружную 1 и внутреннюю 2 трубы, выполненные в виде спирали. На внутренней трубе 2 расположены патрубки 3, 4, соответственно, для входа и выхода нагреваемой жидкости, а на наружной 1 – патрубки 5, 6 для входа и выхода греющего теплоносителя. Поток нагреваемой жидкости (холодной воды) через патрубок 3 направляется во внутреннюю трубу 2, а в противоток через патрубок 5 подается греющий теплоноситель (насыщенный водяной пар), который в виде конденсата выводится из аппарата через патрубок 6.

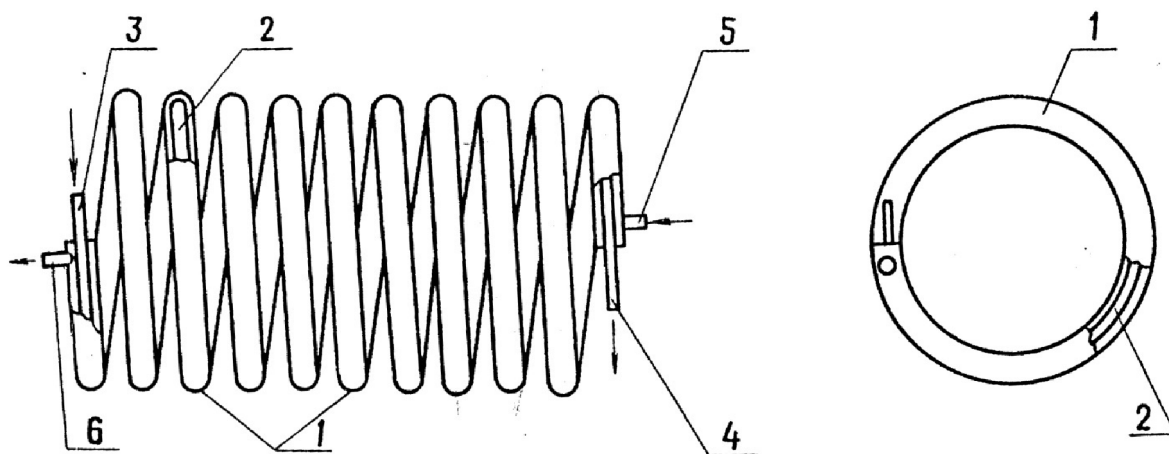


Рис. 50. Схема змеевикового теплообменника типа «труба в трубе»:
1 – наружная труба; 2 – внутренняя труба; 3, 4 – патрубки для входа и выхода теплоносителя; 5, 6 – патрубки для входа выхода нагреваемой жидкости

Такая конструкция аппарата позволяет существенно интенсифицировать теплообмен, при этом уменьшить длину аппарата в 4–5 раза,

диаметр в 3–4 раза, вес в 6–10 раз [122].

На основании проведенных исследований [141] установлено, что в змеевиках по сравнению с прямыми трубами гидравлическое сопротивление осуществляется в такой же мере, в какой повышается коэффициент теплоотдачи [141]. Так, характер изменения коэффициентов сопротивления в змеевике и в прямой трубе при $Re=25000$ показал, что увеличение коэффициента теплоотдачи в 1,5 раза, путем замены прямой трубы змеевиком, достигается при одновременном увеличении гидравлического сопротивления в 1,3 раза.

В прямой трубе при турбулентном режиме соответствующее увеличение скорости при повышении коэффициента теплоотдачи в 1,5 раза приведет к повышению потери давления примерно в 2,5 раза [141].

Применение винтовых змеевиков является целесообразным способом повышения интенсивности теплообменных аппаратов [140, 141].

Рассмотрим характер и специфику движения жидкости в изогнутых трубах-змеевиках [127–144]. При повороте потока жидкости в змеевике возникает центробежная сила, которая приводит к радиальному подъему давления, направленному к наружной стороне закругления. В развитом криволинейном потоке [127; 140; 141]

$$P_2 - P_1 = \rho \omega^2 \frac{d}{R},$$

где P_1 и P_2 – статические давления, соответственно, у внутренней и наружной стороны закругления; R – средний радиус закругления змеевика; d – внутренний диаметр трубы; ω – скорость жидкости в тангенциальном направлении на оси трубы.

Известно, что в ламинарном подслое скорость жидкости резко падает у стенки ($\omega = 0$). Поэтому вблизи стенки изогнутой трубы разность давлений $P_2 - P_1$ не уравнивается центробежной силой, что приводит к

возникновению поперечного течения жидкости от наружной к внутренней стороне закругления. Выполнение условия неразрывности требует, чтобы в ядре потока возникло поперечное течение противоположного направления. Полное развитие поперечных потоков достигается после прохождения жидкостью участка гидродинамической стабилизации, а движение жидкости в этом случае происходит по винтовой линии, шаг которой зависит от соотношения поперечной и осевой скоростей.

Следует отметить, что поперечная циркуляция приводит к значительному нарушению профиля скоростей в сечении изогнутых труб. Профиль становится несимметричным со сдвигом максимума к наружной стороне закругления. Благодаря поперечной циркуляции фактическая скорость жидкости в изогнутой трубе значительно превышает среднюю скорость осевого потока, это приводит к существенному усилению обмена энергией между ядром потока и ламинарным подслоем и, как следствие, к резкому увеличению гидравлического сопротивления.

При ламинарном движении жидкости внутри, фактором, определяющим влияние кривизны, является введенный Динем параметр K_D , зависящий от числа Рейнольдса [128; 145]

$$K_D = \text{Re} \sqrt{\frac{d}{D}},$$

где d – внутренний диаметр змеевика; $D = 2R$, здесь R – радиус кривизны змеевика.

При $K_D < 13,5$ в потоке отсутствует поперечная циркуляция.

При $K_D > 13,5$, хотя течение остается ламинарным, в потоке появляется поперечная циркуляция. Следовательно, значение Re_c , при котором отсутствует поперечная циркуляция, определяется выражением

$$\text{Re}_c = 13,5 \sqrt{\frac{D}{d}}.$$

Ито [131] исследовал гидравлическое сопротивление змеевиковых труб в диапазоне $13,5 \leq K_D \leq 2000$ и установил зависимость

$$\frac{\xi}{\xi_p} = \frac{21,5K_D}{(1,56 + \log K_D)^{5,73}},$$

где ξ_p – коэффициент сопротивления в прямой трубе при тех же значениях критерия Re , что и в изогнутой, при условии $Re < Re_c$. Значения Re_c для области ламинарного течения, ламинарного с поперечной циркуляцией и турбулентного течения приведены в работе [127; 140].

Проведенные исследования [127] показали, что повышение сопротивления в изогнутых трубах в ламинарной области относительно больше, чем в турбулентной. Если при турбулентном режиме коэффициент сопротивления увеличивается всего лишь в 1,5–2,0 раза, при самых малых радиусах закругления R , то при ламинарном режиме он может быть выше коэффициента сопротивления в прямых трубах в несколько раз.

Из чего делается вывод [127], что при турбулентном режиме течения интенсивность поперечной циркуляции относительно слабое и объясняется более равномерным профилем скоростей и меньшей скоростью на оси трубы, а также влиянием турбулентных пульсаций, затрудняющих и тормозящих поперечную циркуляцию жидкости. Это, в свою очередь, приводит к повышению критического числа Re (перехода ламинарного движения в турбулентное) в изогнутых трубах-змеевиках, зависящего, в том числе, и от относительного радиуса кривизны R/d . Так, например, при $R/d=3,1$ критическое число Рейнольдса Re_c повышается до 16000, а при $R/d=1,9$ критическое число Рейнольдса составляет 25000 [127].

Автором [141; 142] также проведено исследование гидродинамики и теплообмена при движении воды в винтовых змеевиках в диапазоне чисел $Re=2000–30000$. Змеевики изготавливались из латунных трубок диаметром

10/12 мм, относительный радиус кривизны змеевика R/d изменялся в диапазоне 3,10–11,90, число витков принималось 3–7, длина изогнутой части $l/d = 99–224$. Исследования показали, что коэффициент теплоотдачи от внутренней стенки змеевика к воде в изогнутых трубах значительно выше, чем в прямых трубах, причем интенсивность теплоотдачи растет с уменьшением относительно радиуса кривизны R/d .

Экспериментально установлено, что показатель степени « n » при критерии Re критериального уравнения [141; 142], при $R/d = 3,1$ в переходной области равен 0,8, в турбулентном режиме при $R/d = 11,9$ равен 1. Увеличение теплоотдачи в змеевиках по сравнению с прямыми трубами предложено учитывать поправочным коэффициентом, зависящим от R/d и Re , ранее предложенными Н. Иешке [183].

Исследованию движения жидкости в изогнутых трубах-змеевиках и процессов теплообмена в них посвящен целый ряд экспериментальных и теоретических работ [140], в том числе Юстиса [132], Миловича [133], Дина [134], Уайта [135], Тейлора [136], Адлера [137], Вольтера [138], Кейлгана и Бейджа [139], Фастовского [129], Щукина [128; 130; 131; 145], Аронова [127; 141; 142].

В работе Мори и Накаямы [145] исследовался теплообмен в изогнутой змеевиковой трубе при отношении радиуса трубы к радиусу закругления равном 40, $Re = 4000$ и больших числах Дина.

Установлено, что если $Pr \geq 1$, а величина $\xi_1 = \frac{\delta_t}{\delta_g} \leq 1$ – отношение теплового δ_t и гидромеханического δ_g пограничного слоя определяется выражением

$$\xi_1 = \frac{2}{11} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{77}{4} \cdot \frac{1}{Pr^2}} \right).$$

В случае если $Pr \leq 1$, а величина $\xi_1 \geq 1$, тогда

$$\xi_1 = \frac{1}{5} \left(2 + \sqrt{\frac{10}{Pr^2} - 1} \right).$$

В первом приближении отношение значений Нуссельта в змеевиковой трубе и прямой трубе предложено представить в виде соотношения

$$\frac{Nu_{zm}}{Nu_p} = 0,1979 \frac{K_D}{\xi_1}.$$

Во втором приближении при $Pr \geq 1$

$$\frac{Nu_{zm}}{Nu_p} = \frac{0,1979 K_D}{\xi_1 + 37,05 \left\{ \frac{1}{40} - \frac{17}{120} \xi_1 + \left(\frac{1}{10 \xi_1} + \frac{13}{30} \right) \frac{1}{10 Pr} \right\} K_D^{-0,5}}.$$

При $Pr < 1$

$$\frac{Nu_{zm}}{Nu_p} = \frac{0,1979 K_D}{\xi_1 - 37,05 \left\{ \frac{\xi_1^2}{12} + \frac{1}{24} - \frac{17}{120 \xi_1} - \left(\frac{4}{3} \xi_1 - \frac{1}{3 \xi_1} + \frac{1}{15 \xi_1^2} \right) \frac{1}{20 Pr} \right\} K_D^{-0,5}}.$$

В последующем принимая во внимание особенности течения жидкости в змеевиках, обусловленные действием инерционных массовых сил, на основе работы [135] и собственных экспериментов Аронов [141; 142] установил, что критическое число Рейнольдса, соответствующие началу турбулентного режима при полностью стабилизированном движении жидкости в змеевике, можно оценить по эмпирической формуле [129; 130; 144; 146]:

$$Re_c = 18500 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,3},$$

где d – диаметр трубы; D – средний диаметр змеевика.

Коэффициент гидравлического сопротивления для змеевика при $Re=10^4-10^5$ и соотношении $\frac{D}{d}=15-4900$ может быть определен по уравнению [130]:

$$\xi = 0,0385 \sqrt{\frac{d}{D}} + 0,312 Re^{-0,25},$$

а коэффициент теплоотдачи, когда параметр $Re\left(\frac{d}{D}\right)^2 = 20...700$, предлагается рассчитывать по формуле [130]:

$$Nu = 0,0266 \left[Re^{0,85} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,25} + 0,025 \left(\frac{d}{D}\right)^{1,55} \right] Pr^{0,4}.$$

В.А. Кирпиков [131] исследовал теплоотдачу при нагреве воды в змеевиках при $D/d=10-18$ и критерии Рейнольдса в диапазоне $Re=10^4-4,5 \cdot 10^4$, и предложил критериальное уравнение:

$$Nu = 0,0456 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left(\frac{d}{D}\right)^{0,21}.$$

По мнению [141] расчет теплоотдачи в изогнутых трубах-змеевиках удобнее производить по формуле для прямой трубы:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25},$$

с последующим введением в качестве сомножителя поправочного коэффициента [183]

$$\xi_R = 1 + 3,54 \frac{d}{D}.$$

Поправка [183] учтена в работе [141] при соотношении $\frac{D}{d}=6,6-20$,

$\frac{L}{d}=125$ и $Re=10^4-4,5 \cdot 10^4$, где d – диаметр трубы; D – диаметр змеевика;

L – длина змеевика.

4.2. Конструкции инновационных змеевиковых теплообменников

В целях снижения металлоемкости и интенсификации теплообмена в аппарате авторами данной работы предложен ряд инновационных змеевиковых теплообменников типа «труба в трубе» [89; 123–126].

В работе [89] предложен змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе» (рис. 51), содержащий внешнюю 1 и внутреннюю 2 трубы, выполненные в виде витой спирали и расположенные с образованием между ними межтрубного пространства. Внутренняя труба 2 теплообменника выполнена в виде пружинно-витого канала круглого или эллиптического сечений, а внешняя из гладкой цилиндрической трубы. Во внутреннюю трубу подают нагреваемую жидкость, а в межтрубное пространство в противопоток – насыщенный водяной пар.

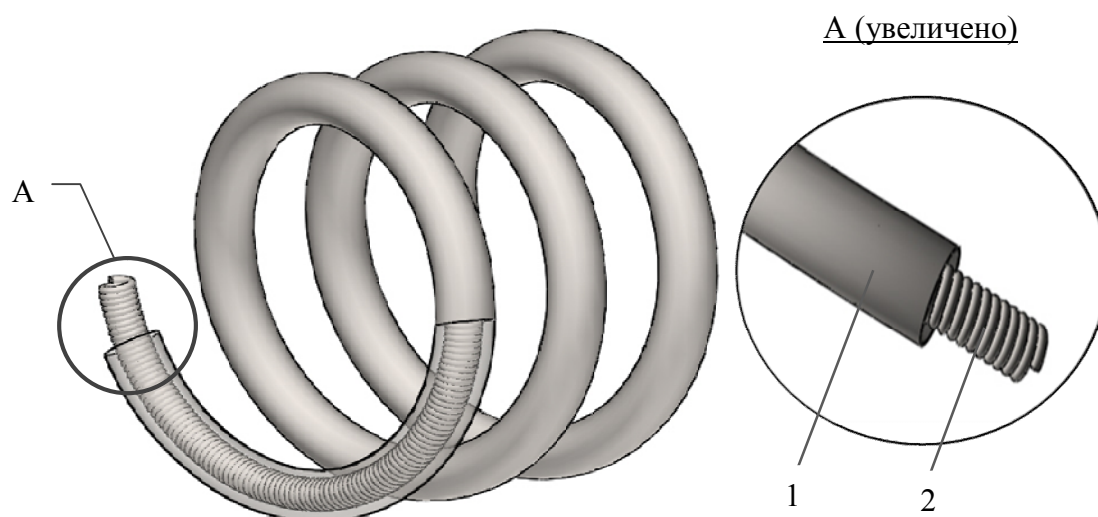


Рис. 51. Змеевиковый теплообменник
типа «труба в трубе» с пружинно-витым каналом:
1 – внешняя труба; 2 – внутренняя труба

При таком конструктивном решении жидкость движется по сложной траектории. Во-первых, по виткам проточной части внутреннего змеевика, где реализуется закрученное течение жидкости по внутренним впадинам пружинно-витого канала, и, во-вторых, по винтовой линии, определяемой витками самого змеевикового теплообменного элемента.

Пар, подаваемый в межтрубное пространство, из-за внешнего винтового оребрения внутреннего змеевика также совершает закрученное течение, характеризующееся сложной трехмерной вихревой структурой потока, благоприятно влияющее на теплообменные процессы, протекающие в межтрубном пространстве.

В связи с этим змеевиковые теплообменники на базе пружинновитых каналов обеспечивают высокие коэффициенты теплоотдачи на внутренней и внешней стенках змеевиковых элементов, что позволяет существенно увеличить коэффициенты теплопередачи и тем самым снизить габаритные размеры аппарата в сравнении с известными теплообменными устройствами этого класса.

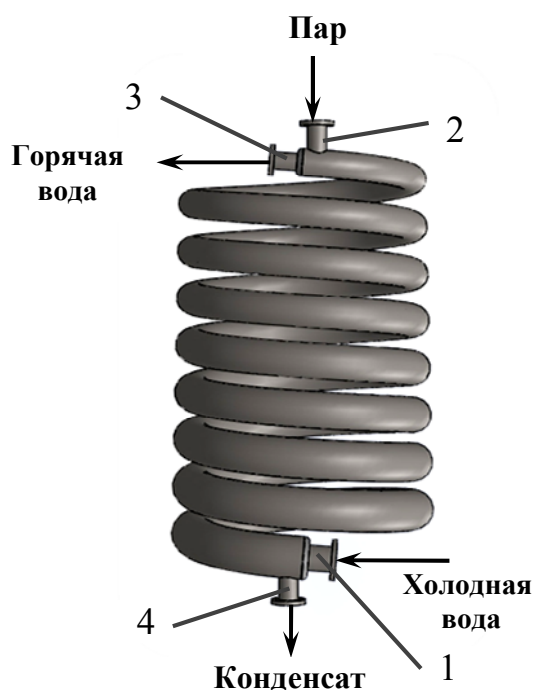


Рис. 52. Змеевиковый теплообменник в виде цилиндра с трубами на конус

В целях дальнейшего снижения металлоемкости аппарата и дальнейшей интенсификации теплообмена авторами предложена конструкция теплообменного аппарата (рис. 52), изготовленного в виде винтовой спирали, проточная часть внутренней трубы и межтрубного пространства которого выполнены с сужающимися живыми сечениями [123].

При противоточной схеме движения теплоносителей холодная вода через штуцер 1 поступает во внутреннюю трубу с сужающимся живым сечением.

Одновременно в межтрубное коническое пространство через штуцер 2 подается насыщенный водяной пар.

Пройдя проточную часть теплообменника, горячая вода через штуцер 3, а конденсат через штуцер 4 выводятся из аппарата.

В процессе движения воды в проточной части трубы с сужающимся живым сечением, ее скорость увеличивается.

Это вызывает дополнительную турбулизацию потока и рост коэффициента теплоотдачи от внутренней стенки трубы.

Под действием центробежной силы, возникающей при движении теплоносителя по змеевику, происходит сброс конденсатной пленки с внешней поверхности внутренней трубы, что снижает термическое сопротивление конденсатной пленки и вызывает рост коэффициента теплоотдачи на наружной стенке внутренней трубы.

Снижение частных термических сопротивлений теплоотдачи приводит к росту коэффициента теплопередачи, что в последующих процессах проектирования позволит снизить габаритные размеры теплообменного аппарата.

В стремлении увеличить эффективность теплообменного оборудования привело к созданию змеевиковых теплообменников [125] в виде усеченных конусов (рис. 53) с цилиндрическими трубами (рис. 53а) и трубами на конус (рис. 53б).

Змеевиковый теплообменник (рис. 53б) работает следующим образом. При противоточной схеме движения теплоносителей холодная вода через штуцер 1 поступает во внутреннюю трубу, выполненную с сужающим сечением на конус. Одновременно через штуцер, установленный во внешнем змеевике, в межтрубное пространство подается насыщенный водяной пар.

Пройдя проточную часть теплообменника, горячая вода через штуцер 3, а пар через штуцер 4 выводятся из аппарата.

В процессе движения нагреваемого теплоносителя (воды) по трубе, проточная часть которой выполнена с сужающимся сечением на конус, скорость теплоносителя увеличивается, так как заданный расход жидкости остается неизменным, а живое сечение проточной части трубы уменьшается. Это вызывает сразу рост критерия Рейнольдса, а, следовательно, и коэффициентов теплоотдачи (α_1).

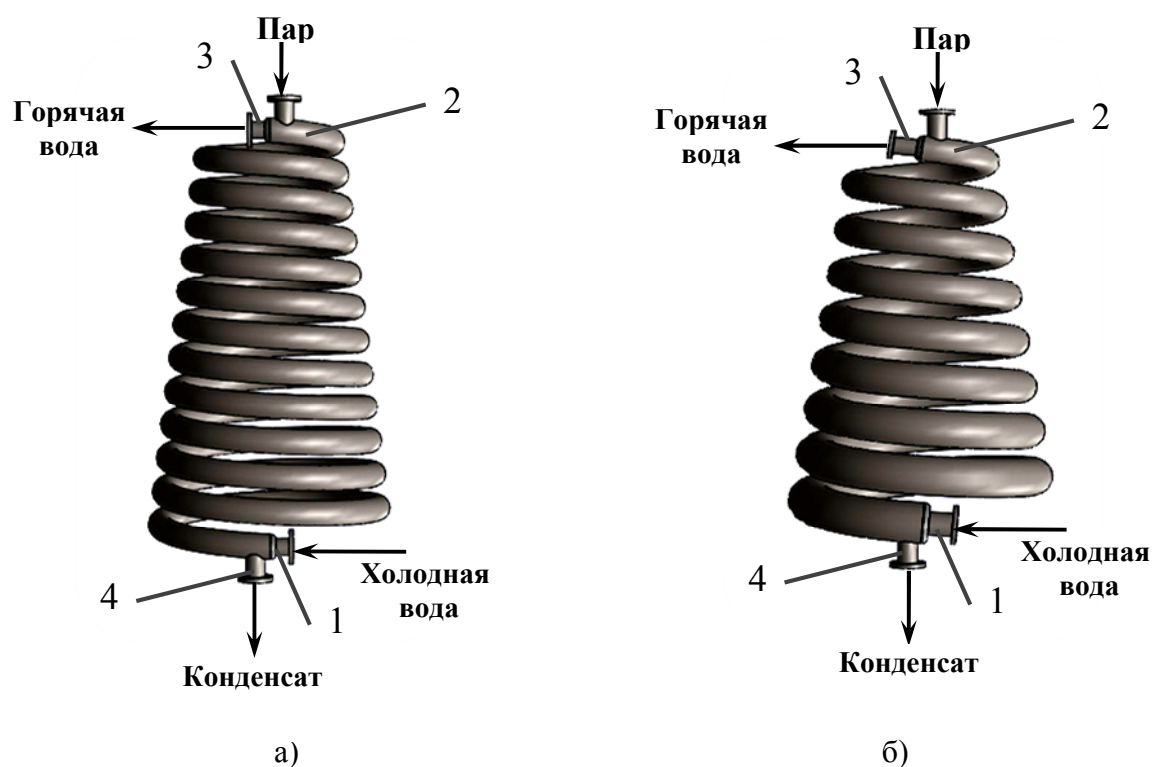


Рис. 53. Змеевиковый теплообменник в виде усеченного конуса:
а) с цилиндрическими трубами; б) с трубами на конус

При подаче пара в межтрубное пространство, выполненное с сужающимся пространством на конус, скорость также «ускоряется».

В этом случае наряду с ростом критерия Рейнольдса, под действием центробежной силы (в результате движения теплоносителя по змеевику), происходит сброс конденсатной пленки, вызывающей термическое

сопротивление теплоотдачи от пара к внешней стенке внутренней трубы, выполненной с сужающимся сечением на конус. Это также способствует увеличению коэффициента теплоотдачи (α_2).

В целом увеличение коэффициентов α_1 и α_2 влечет к росту коэффициента теплопередачи, а в последующем снижению габаритов теплообменника.

Кроме того, авторами предложен змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе» в форме шара (рис. 54) из цилиндрических труб (рис. 54 а) и труб на конус (рис. 54 б) [176].

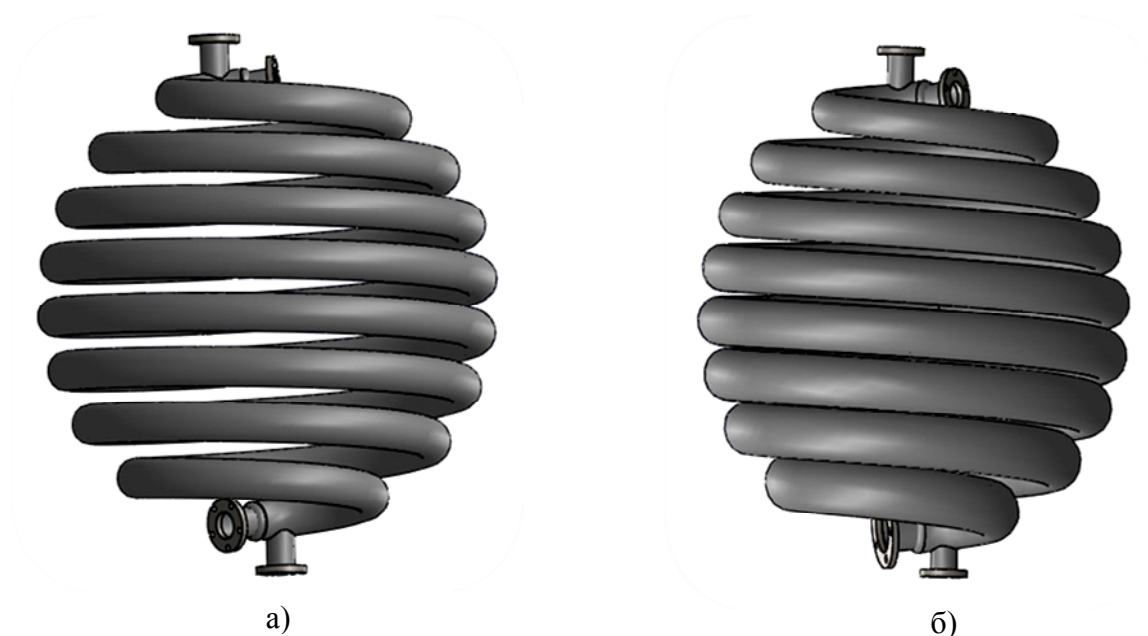


Рис. 54. Змеевиковый теплообменник в форме шара:
а) из цилиндрических труб; б) из труб на конус

Компактные по размерам такие теплообменники могут быть использованы в системе транспортировки и нагрева нефтепродуктов в зимних условиях.

Пар, используемый для подогрева нефтепродукта от внешних стенок теплообменника, одновременно служит и для нагрева воды во внутренних трубах аппарата, что важно для технологических и производственных нужд промышленных объектов нефтепромыслов.

Дальнейшим развитием конструкций змеевиковых аппаратов является змеевиковый теплообменник, представленный на рис. 55, выполненный в виде многосекционного теплообменного аппарата, в котором реализуются противоточные движения в одной его секции и противоточные движения теплоносителей по всему каскаду аппаратов.

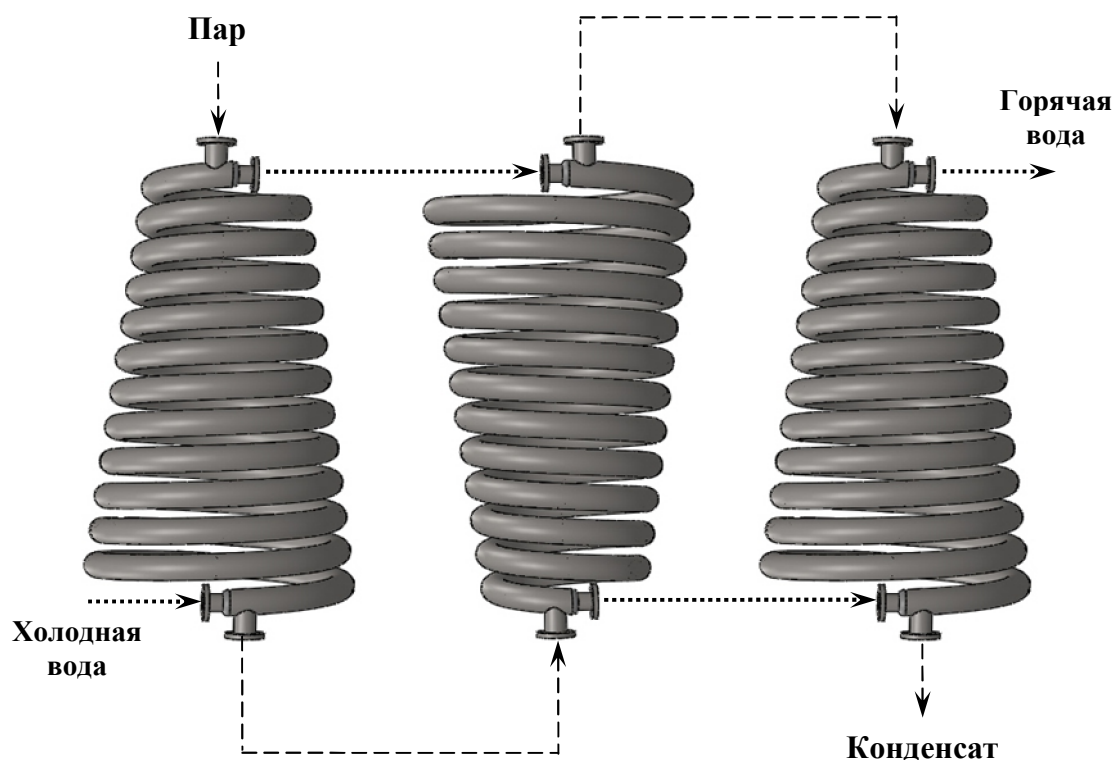


Рис. 55. Схема компоновки секций в каскаде теплообменных аппаратов

Следует отметить, что внутренние трубы змеевиковых теплообменников могут быть выполнены различной модификации, в том числе в виде пружинно-витых каналов, полученных с помощью лазерной сварки [116] и винтовых теплообменных элементов типа «конфузор-диффузор», изготовленных с использованием ротационнойковки [117; 122].

На рис. 56 представлен кожухотрубный теплообменник [90], содержащий корпус и трубные решетки, в которых закреплен трубный пучок, выполненный из теплообменных элементов типа «труба в трубе».

Внешние трубы теплообменных элементов пучка закреплены в дополнительных трубных решетках, установленных в корпусе между трубными решетками внутренних трубок теплообменного элемента пучка.

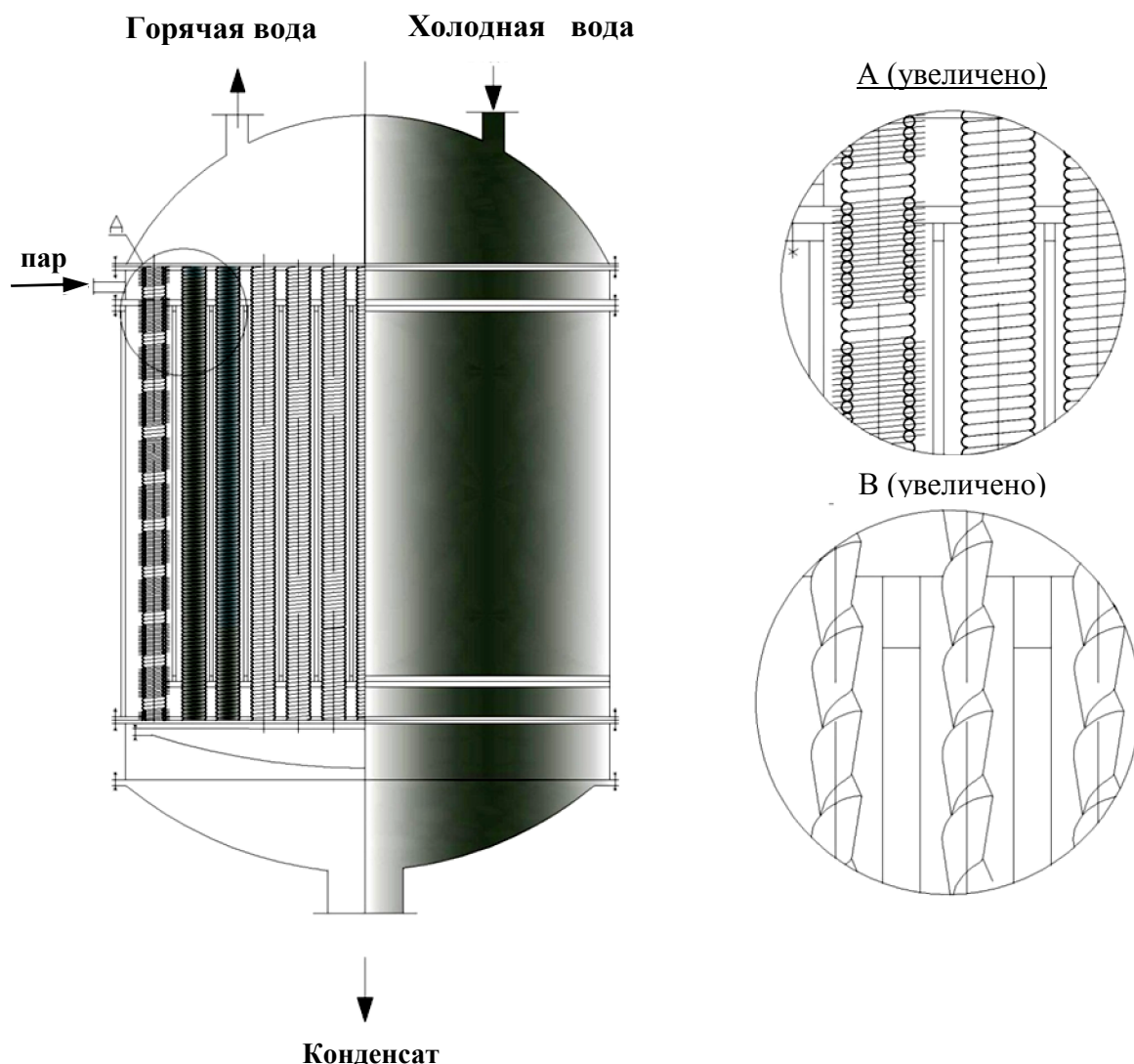


Рис. 56. Кожухотрубчатый теплообменник

Внутренние трубки выполнены в виде пружинно-витых каналов. Благодаря этому в стесненном кольцевом межтрубном пространстве теплообменного элемента типа «труба в трубе» реализуется эффект закручивания теплоагента на внешней стенке трубы, что вызывает срыв конденсатной пленки с поверхности трубок и переход пленочной

конденсации в «пленочно-капельную» или «капельную», вызывая рост коэффициентов теплоотдачи.

Недостатком этого теплообменника является высокая металлоемкость конструкции, кроме того если средняя разность температур пучка труб и корпуса равна или больше 50°C , то трубы и корпус удлиняются неодинаково, что вызывает значительные напряжения в трубных пучках. Это нарушает плотность соединения труб с решетками, вызывая разрушение сварных швов, недопустимому смещению обменивающихся теплом сред [46].

В целях достижения высокой эффективности теплообмена в теплообменном аппарате, снижения его металлоемкости и температурных деформаций в трубах, а также возможности использования аппарата в условиях широкого интервала разности температур в трубных пучках предложен теплообменник нежесткой конструкции (рис. 57).

Трубчатый теплообменный аппарат 1 выполнен без кожуха и состоит из трубных пучков 2 и 3. Трубы трубных пучков установлены концентрически относительно друг друга и образуют систему теплообменников типа «труба в трубе» 4. Трубы трубного пучка 2 (большого диаметра) закреплены в трубных решетках 5, а трубы трубного пучка 3 (меньшего диаметра) установлены в трубных решетках 6. Над верхней трубной решеткой 5 трубного пучка 2 смонтирована камера 7 для равномерного распределения теплоагента в трубы трубного пучка 2, снабженная патрубком 8 для подачи пара. Нижняя трубная решетка 5 трубного пучка 2 закрыта крышкой 9 и снабжена патрубком 10 для отвода конденсата. Таким образом, нижняя трубная решетка с крышкой 9 представляет собой плавающую головку. Нижняя трубная решетка 6 трубного пучка 3 закрыта крышкой 11 и представляет собой также плавающую головку.

Сверху к трубной решетке 6 крепится крышка 12, разделенная перегородкой 13 на секции I и II, снабженная патрубками 14 и 15 для ввода и вывода нагреваемого теплоагента (холодной и горячей воды).

Теплообменный аппарат работает следующим образом. При однократном смешанном токе движения теплоносителей холодная вода через патрубок 14 секции II в крышке 12 поступает в трубчатый теплообменный аппарат 1 и далее движется по трубам трубного пучка 3, установленным в трубных решетках 6. Одновременно через патрубок 8 камеры 7 подается насыщенный водяной пар, который двигаясь по кольцевому пространству между трубами трубных пучков 2 и 3 теплообменников типа «труба в трубе» 4 нагревает воду в трубах трубного пучка 3, которая движется в секцию I крышки 12 и далее через патрубок 15 в виде горячей воды выводится из трубчатого теплообменного аппарата 1. Отработанный пар в виде конденсата через патрубок 10, пройдя конденсационный горшок, также выводится из трубчатого теплообменного аппарата 1.

Предлагаемая конструкция аппарата, состоящая из системы теплообменников типа «труба в трубе», каждый из которых имеет небольшое поперечное сечение трубного и межтрубного пространства, позволяет при небольших расходах достигать высокие скорости нагреваемой жидкости (порядка 1–1,5 м/с). Это обеспечивает требуемые коэффициенты теплоотдачи и высокие тепловые нагрузки на единицу массы аппарата.

Кроме того, в аппарате с двумя плавающими головками, предотвращаются значительные температурные напряжения в трубах трубных пучков 2 и 3 и трубных решетках 5 и 6 при значительной разнице температур между трубами, что исключает возможность нарушения плотности соединения труб с трубными решетками, предотвращается разрушение сварных швов и недопустимое смещение обменивающихся

теплом сред. В теплообменнике предлагаемой конструкции трубы могут удлиняться под действием температуры независимо от температуры друг друга.

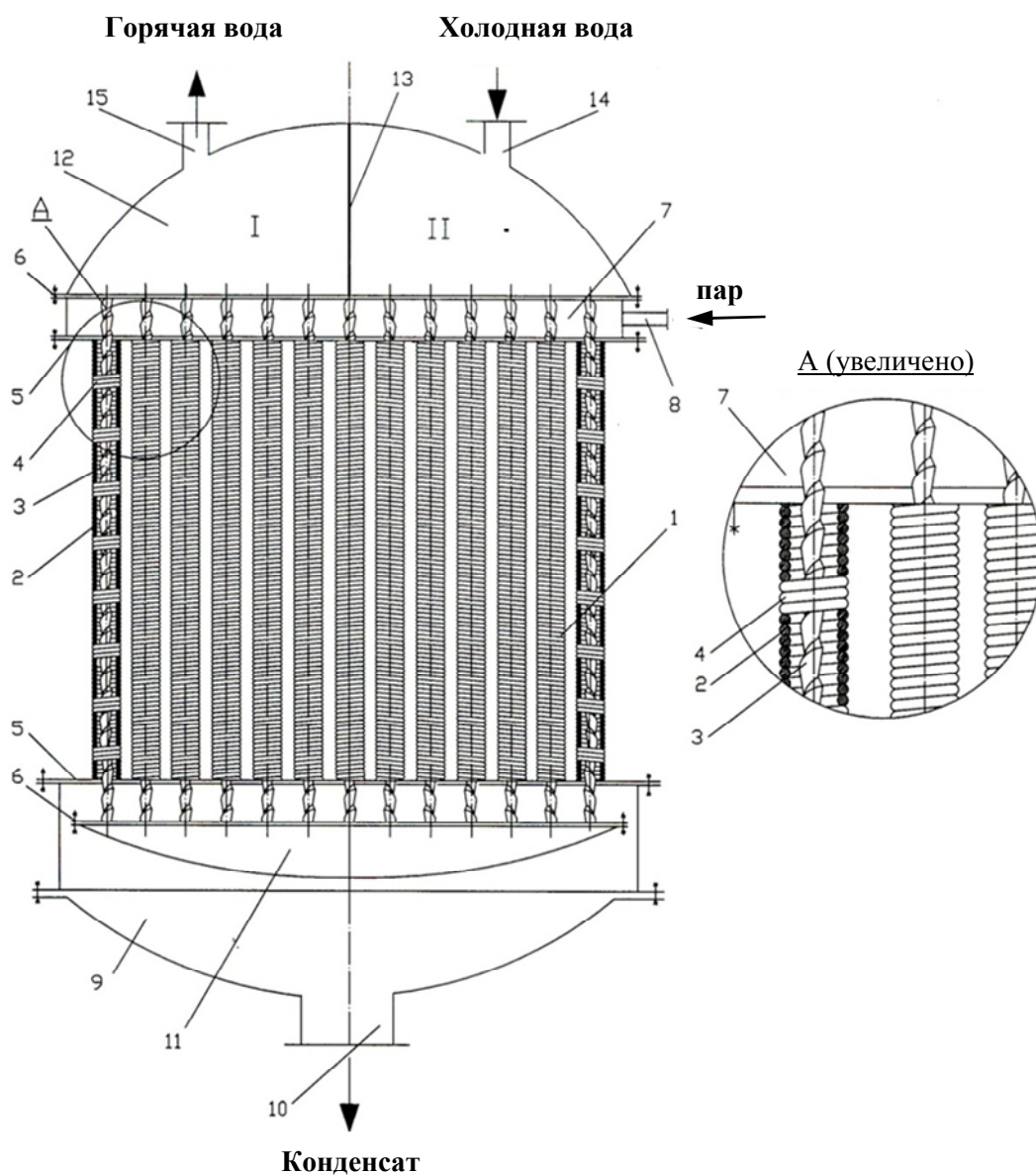


Рис. 57. Трубчатый теплообменный аппарат, выполненный без кожуха:

- 1 – теплообменный аппарат; 2,3 – трубный пучок;
- 4 – система теплообменников типа «труба в трубе»;
- 5, 6 – трубные решетки; 7 – камера;
- 8 – патрубок для подачи пара; 9, 11, 12 – крышки;
- 10 – патрубок для отвода конденсата; 13 – перегородка;
- 14, 15 – патрубки для ввода и вывода нагреваемого теплоагента

4.3. Сопряженная задача теплообмена при течении жидкостей в змеевиках с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали

Запишем математическую модель сопряженной задачи теплообмена при течении жидкостей в змеевиковом теплообменнике в виде усеченного конуса (рис. 58).

Будем считать, что движение несжимаемой жидкости имеет стационарный, неизотермический и турбулентный характер. Плотность ρ , теплоемкость C_p и коэффициент теплопроводности λ_f при движении жидкости в змеевиковых каналах меняется незначительно. Зависимость молекулярной вязкости μ от температуры T может быть представлена в аррениусовском виде

$$\mu(T) = \mu_0 e^{-\frac{E}{R(T-T_0)}},$$

где μ_0 – молекулярная вязкость при температуре T_0 ; E – энергия активации вязкого течения; R – универсальная газовая постоянная.

С целью использования геометрической симметрии змеевиковых каналов и предполагая, что радиус изгиба змеевика много больше диаметра канала, используем специальную ортогональную систему координат, связанную с осевой винтовой линией с изменяющейся величиной радиуса изгиба, определяемой уравнением [187]

$$\vec{\rho}(\varphi) = a(\varphi)\vec{e}(\varphi) + K\varphi\vec{k},$$

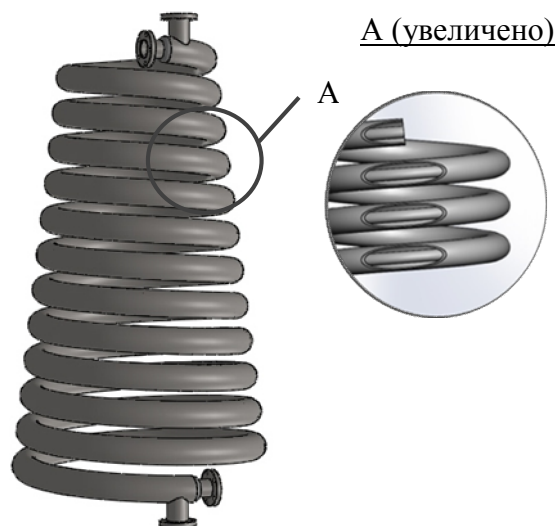


Рис. 58. Змеевиковый аппарат типа «труба в трубе», выполненный на конус

или в координатной форме в виде

$$\begin{cases} x = a(\varphi) \cos \varphi, \\ y = a(\varphi) \sin \varphi, \\ z = K \varphi, \end{cases}$$

где $\vec{\rho}(\varphi)$ – радиус-вектор точки на осевой линии; $\vec{e}(\varphi) = \vec{i} \cos \varphi + \vec{j} \sin \varphi$; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты декартовой системы координат (\vec{k} – единичный вектор, направленный по оси z); φ – параметр винтовой линии; $K = \frac{S}{2\pi}$; S – шаг винтового канала; $a(\varphi)$ – радиус изгиба оси винтовой линии (рис. 59).

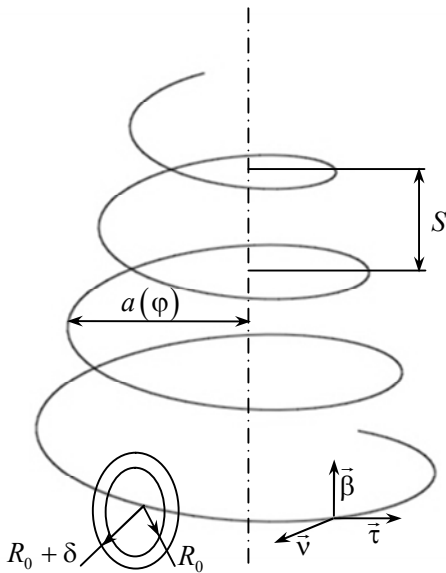


Рис. 59. Система координат

Эта система координат является обобщением системы, полученной в [179] для случая осевой винтовой линии с постоянным радиусом изгиба.

Определяя векторы сопровождающего репера для данной осевой винтовой линии, и используя их в качестве базисных векторов $\vec{\tau}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}$, получим новые переменные b, φ, ψ , которые связаны с переменными декартовой системы координат x, y, z

соотношениями

$$\begin{cases} x = a(\varphi) \cos \varphi + b(v_x(\varphi) \cos(\psi + \theta(\varphi)) + \beta_x(\varphi) \sin(\psi + \theta(\varphi))), \\ y = a(\varphi) \sin \varphi + b(v_y(\varphi) \cos(\psi + \theta(\varphi)) + \beta_y(\varphi) \sin(\psi + \theta(\varphi))), \\ z = K \varphi + b(v_z(\varphi) \cos(\psi + \theta(\varphi)) + \beta_z(\varphi) \sin(\psi + \theta(\varphi))), \end{cases}$$

где

$$\theta(\varphi) = - \int_{\varphi_0}^{\varphi} \kappa(\varphi) \sqrt{(a')^2 + a^2 + K^2} d\varphi;$$

$$\begin{aligned}\vec{\tau} &= \frac{a' \vec{e}(\varphi) + a \vec{g}(\varphi) + K \vec{k}}{\sqrt{(a')^2 + a^2 + K^2}}; \\ \vec{\beta} &= \frac{K(-2a' \vec{e}(\varphi) + (a'' - a) \vec{g}(\varphi))}{\sqrt{K^2(4(a')^2 + (a'' - a)^2) + (-a''a + 2(a')^2 + a^2)^2}} + \\ &+ \frac{(-a''a + 2(a')^2 + a^2) \vec{k}}{\sqrt{K^2(4(a')^2 + (a'' - a)^2) + (-a''a + 2(a')^2 + a^2)^2}}; \\ \vec{v} &= \frac{(K^2(a'' - a) - a''a^2 + 2(a')^2 a + a^3) \vec{e}(\varphi)}{\sqrt{v_0}} + \\ &+ \frac{a'(a''a - 2(a')^2 - a^2 - 2K^2) \vec{g}(\varphi) + Ka'(a + a'') \vec{k}}{\sqrt{v_0}}; \\ v_0 &= (K^2(a'' - a) - a''a^2 + 2(a')^2 a + a^3)^2 + \\ &+ (a')^2(a''a - 2(a')^2 - a^2 - 2K^2)^2 + K^2(a')^2(a + a'')^2; \\ \kappa(\varphi) &= \frac{(-2Ka'(a''' - 3a'') + K(a'' - a)(3a'' - a))}{4(a')^2 K^2 + K^2(a'' - a)^2 + (-a''a + 2(a')^2 + a^2)^2} - \text{крючение осевой}\end{aligned}$$

линии канала; $\vec{g}(\varphi) = -\vec{i} \sin \varphi + \vec{j} \cos \varphi$.

В частном случае линейного изменения радиуса изгиба канала

$$a(\varphi) = a_0 + a_{00}\varphi,$$

где a_0 радиус изгиба канала на входе в канал; a_{00} – скорость изменения радиуса изгиба канала; получим следующие выражения для векторов сопровождающего репера

$$\vec{\tau} = \frac{a_{00} \vec{e}(\varphi) + a \vec{g}(\varphi) + K \vec{k}}{\sqrt{a_{00}^2 + a^2 + K^2}};$$

$$\begin{aligned}\vec{\beta} &= \frac{K(-2a_{00}\vec{e}(\varphi) - a\vec{g}(\varphi))}{\sqrt{K^2(4a_{00}^2 + a^2) + (2a_{00}^2 + a^2)^2}} + \frac{(2a_{00}^2 + a^2)\vec{k}}{\sqrt{K^2(4a_{00}^2 + a^2) + (2a_{00}^2 + a^2)^2}}; \\ \vec{v} &= \frac{(-K^2a + 2a_{00}^2a + a^3)\vec{e}(\varphi)}{\sqrt{v_0}} + \frac{a_{00}(-2a_{00}^2 - a^2 - 2K^2)\vec{g}(\varphi) + Ka_{00}a\vec{k}}{\sqrt{v_0}}; \\ v_0 &= (-K^2a + 2a_{00}^2a + a^3)^2 + a_{00}^2(-2a_{00}^2 - a^2 - 2K^2)^2 + K^2a_{00}^2a^2; \\ \kappa(\varphi) &= \frac{(6Ka_{00}^2 + Ka^2)}{4a_{00}^2K^2 + K^2a^2 + (-2a_{00}^2 + a^2)^2}.\end{aligned}$$

В случае постоянного значения радиуса изгиба канала $a(\varphi) = a_0$, получим следующие выражения для векторов сопровождающего репера

$$\vec{\tau} = \frac{a_0\vec{g}(\varphi) + K\vec{k}}{\sqrt{a_0^2 + K^2}}; \vec{\beta} = \frac{-K\vec{g}(\varphi) + a_0\vec{k}}{\sqrt{K^2 + a_0^2}}; \vec{v} = \vec{e}(\varphi); \kappa(\varphi) = \frac{K}{K^2 + a_0^2} = const.$$

Для данной системы координат b, φ, ψ имеем следующие характеристики.

1. Коэффициенты Ляме:

$$\begin{aligned}H_\varphi &= \sqrt{(a')^2 + a^2 + K^2} \times \\ &\left(1 - \frac{\sqrt{4(a')^2 K^2 + K^2(a'' - a)^2 + (-a''a + 2(a')^2 + a^2)^2}}{\sqrt{((a')^2 + a^2 + K^2)^3}}\right) \times b \cos(\psi + \theta(\varphi)),\end{aligned}$$

$$H_{\psi\psi} = b,$$

$$H_{bb} = 1.$$

В случае линейного изменения радиуса закругления

$$H_\varphi = \sqrt{a_{00}^2 + a^2 + K^2} \times \left(1 - \frac{\sqrt{4a_{00}^2 K^2 + K^2 a^2 + (2a_{00}^2 + a^2)^2}}{\sqrt{(a_{00}^2 + a^2 + K^2)^3}} b \cos(\psi + \theta)\right).$$

В случае постоянного радиуса закругления

$$H_{\varphi} = \sqrt{a^2 + K^2} \left(1 - \frac{ab}{(a^2 + K^2)} \cos(\psi + \theta) \right).$$

Остальные коэффициенты Ляме такие же, как в общем случае.

2. Ненулевые символы Кристоффеля:

$$\begin{aligned} \Gamma_{\varphi\varphi}^{\varphi} &= \frac{1}{H_{\varphi}} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \varphi}, \quad \Gamma_{\varphi\psi}^{\varphi} = \Gamma_{\psi\varphi}^{\varphi} = \frac{1}{H_{\varphi}} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \psi}, \quad \Gamma_{\varphi b}^{\varphi} = \Gamma_{b\varphi}^{\varphi} = \frac{1}{H_{\varphi}} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial b}, \\ \Gamma_{\psi b}^{\psi} &= \Gamma_{b\psi}^{\psi} = \frac{1}{b}, \quad \Gamma_{\varphi\varphi}^{\psi} = -\frac{H_{\varphi}}{b^2} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \psi}, \quad \Gamma_{\varphi\varphi}^b = -H_{\varphi} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial b}, \quad \Gamma_{\psi\psi}^b = -b. \end{aligned}$$

В выбранной системе координат уравнения движения, неразрывности и переноса количества энергии примет вид

$$\begin{aligned} & \rho \left[\frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (H_{\varphi} b V_{\langle \varphi \rangle} V_{\langle \varphi \rangle}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_{\varphi}^2 V_{\langle \psi \rangle} V_{\langle \varphi \rangle}) \right) \right] + \\ & + \rho \left[\frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_{\varphi}^2 b V_{\langle b \rangle} V_{\langle \varphi \rangle}) \right) - V_{\langle \varphi \rangle} V_{\langle \varphi \rangle} \frac{1}{H_{\varphi}} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \varphi} \right] = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (H_{\varphi} b T_{\langle \varphi \varphi \rangle}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_{\varphi}^2 T_{\langle \psi \varphi \rangle}) \right) + \\ & + \frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (b H_{\varphi}^2 T_{\langle b \varphi \rangle}) \right) - T_{\langle \varphi \varphi \rangle} \frac{1}{H_{\varphi}} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \varphi}; \\ & \rho \left[\frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b^2 V_{\langle \varphi \rangle} V_{\langle \psi \rangle}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_{\varphi} b V_{\langle \psi \rangle} V_{\langle \psi \rangle}) \right) \right] + \\ & + \rho \left[\frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_{\varphi} b^2 V_{\langle b \rangle} V_{\langle \psi \rangle}) \right) - V_{\langle \varphi \rangle} V_{\langle \varphi \rangle} \frac{1}{H_{\varphi}} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \psi} \right] = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b^2 T_{\langle \varphi \psi \rangle}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_{\varphi} b T_{\langle \psi \psi \rangle}) \right) + \\ & + \frac{1}{H_{\varphi} b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_{\varphi} b^2 T_{\langle b \psi \rangle}) \right) - T_{\langle \varphi \varphi \rangle} \frac{1}{H_{\varphi}} \frac{\partial H_{\varphi}}{\partial \psi}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b V_{\langle \varphi \rangle} V_{\langle b \rangle}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi V_{\langle \psi \rangle} V_{\langle b \rangle}) \right) \right] + \\
& + \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi b V_{\langle b \rangle} V_{\langle b \rangle}) \right) - V_{\langle \varphi \rangle} V_{\langle \varphi \rangle} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} - V_{\langle \psi \rangle} V_{\langle \psi \rangle} \frac{1}{b} \right] = \\
& = -\frac{\partial P}{\partial b} + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b T_{\langle \varphi b \rangle}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi T_{\langle \psi b \rangle}) \right) + \\
& + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi b T_{\langle b b \rangle}) \right) - T_{\langle \varphi \varphi \rangle} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} - T_{\langle \psi \psi \rangle} \frac{1}{b}; \\
& \frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho V_\varphi b) + \frac{\partial}{\partial \psi} (\rho V_\psi H_\varphi) + \frac{\partial}{\partial b} (\rho V_b H_\varphi b) = 0,
\end{aligned}$$

где $T_{\langle ij \rangle} = 2(\mu + \mu_t) D_{\langle ij \rangle}$, $(i = \varphi, \psi, b; j = \varphi, \psi, b)$ – физические компоненты девиатора тензора напряжений; $V_{\langle i \rangle}$, $(i = \varphi, \psi, b)$ – физические компоненты вектора скорости;

$D_{\langle ij \rangle} = \frac{1}{2} \left((\nabla V)_{\langle ij \rangle} + (\nabla V^T)_{\langle ij \rangle} \right)$, $(i = \varphi, \psi, b; j = \varphi, \psi, b)$ – физические компоненты тензора скоростей деформаций:

$$\begin{aligned}
D_{\langle \varphi \varphi \rangle} &= \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} \right) + \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \varphi} \frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} + \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi} \frac{V_{\langle \psi \rangle}}{b} + \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} \frac{V_{\langle b \rangle}}{1}; \\
D_{\langle \psi \psi \rangle} &= \left(\frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{V_{\langle \psi \rangle}}{H_\psi} \right) + \frac{1}{b} \frac{V_{\langle b \rangle}}{1} \right), \quad D_{\langle b b \rangle} = \left(\frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{V_{\langle b \rangle}}{1} \right) \right); \\
D_{\langle \varphi \psi \rangle} &= D_{\langle \psi \varphi \rangle} = \frac{b}{2H_\varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{V_{\langle \psi \rangle}}{b} \right) - \frac{H_\varphi}{b^2} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi} \frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} \right) + \frac{H_\varphi}{2b} \left(\frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} \right) + \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi} \frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} \right); \\
D_{\langle \varphi b \rangle} &= D_{\langle b \varphi \rangle} = \frac{1}{2H_\varphi} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{V_{\langle b \rangle}}{1} \right) - \frac{H_\varphi}{1^2} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} \frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} \right) + \frac{H_\varphi}{2} \left(\frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} \right) + \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} \frac{V_{\langle \varphi \rangle}}{H_\varphi} \right); \\
D_{\langle \psi b \rangle} &= D_{\langle b \psi \rangle} = \frac{1}{2b} \left(\frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{V_{\langle b \rangle}}{1} \right) - \frac{b}{1^2} \frac{V_{\langle \psi \rangle}}{b} \right) + \frac{b}{2} \left(\frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{V_{\langle \psi \rangle}}{b} \right) + \frac{1}{b} \frac{V_{\langle \psi \rangle}}{b} \right).
\end{aligned}$$

$$\rho C_p \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b V_{\langle \varphi \rangle} T) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi V_{\langle \psi \rangle} T) + \frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi b V_{\langle b \rangle} T) \right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial \varphi} \left((\lambda + \lambda_t) \frac{b}{H_\varphi} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left((\lambda + \lambda_t) \frac{H_\varphi}{b} \frac{\partial T}{\partial \psi} \right) + \frac{\partial}{\partial b} \left((\lambda + \lambda_t) H_\varphi b \frac{\partial T}{\partial b} \right),$$

μ_t – турбулентная вязкость; $\lambda_t = \frac{C_p \mu_t}{Pr_t}$ – коэффициент турбулентной теплопроводности; Pr_t – турбулентный аналог числа Прандтля, обычно полагаемый равным константе ($Pr_t = 0.9$); ∇V – тензор градиента скоростей; ∇V^T – транспонированный тензор градиента скоростей.

К данной системе осредненных по Рейнольдсу уравнений следует добавить уравнения, определяющие модель турбулентности. В последнее время все большую популярность приобретает модель турбулентности Ментера [180; 181], которая имеет преимущества как $k-\varepsilon$ модели, так и $k-\omega$ модели.

В выбранной системе координат уравнения переноса кинетической энергии турбулентности k запишется как

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b V_{\langle \varphi \rangle} k) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi V_{\langle \psi \rangle} k) + \frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi b V_{\langle b \rangle} k) \right) =$$

$$= \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{b}{H_\varphi} \frac{\partial k}{\partial \varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \psi} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{H_\varphi}{b} \frac{\partial k}{\partial \psi} \right) \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial b} \left((\mu + \sigma_k \mu_t) H_\varphi b \frac{\partial k}{\partial b} \right) + P_k - \rho \beta^* \omega k,$$

а для удельной диссипации ω , которая связана с кинетической энергией диссипации k и изотропной диссипацией ε соотношением $\varepsilon = C_\mu k \omega$, в виде

$$\rho \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b V_{\langle \varphi \rangle} \omega) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi V_{\langle \psi \rangle} \omega) + \frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi b V_{\langle b \rangle} \omega) \right) = \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{(\mu + \sigma_k \mu_t) \sqrt{g}}{g_{\varphi\varphi}} \frac{\partial \omega}{\partial \varphi} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{(\mu + \sigma_k \mu_t) \sqrt{g}}{g_{\psi\psi}} \frac{\partial \omega}{\partial \psi} \right) + \frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{(\mu + \sigma_k \mu_t) \sqrt{g}}{g_{bb}} \frac{\partial \omega}{\partial b} \right) + \rho \frac{\gamma}{\mu_t} P_k - \rho \beta \omega^2 + (1 - F_1) D_{k\omega},$$

В этих выражениях введены следующие обозначения

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4), F_2 = \tanh(\arg_2^2),$$

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{0,09\omega d}, \frac{500\nu}{d^2\omega} \right), \frac{4\rho_{sm}k\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}d^2} \right], \arg_2 = \max \left(\frac{2\sqrt{k}}{0,09\omega d}, \frac{500\nu}{d^2\omega} \right),$$

$$\phi = F_1\phi_1 + (1 - F_1)\phi_2, \quad \phi = \{\sigma_k, \sigma_\omega, \beta\},$$

$$CD_{\omega k} = \max(D_{k\omega}, 10^{-20}), \quad D_{k\omega} = \frac{2\rho\sigma_{\omega 2}}{\omega}(\nabla k) \cdot (\nabla \omega),$$

$$\sigma_{k1} = 0,85; \quad \sigma_{\omega 1} = 0,5; \quad \beta_1 = 0,075;$$

$$\sigma_{k2} = 1,0; \quad \sigma_{\omega 2} = 0,856; \quad \beta_2 = 0,0828;$$

$$\beta^* = 0,09; \quad \kappa = 0,41; \quad a_1 = 0,31; \quad \gamma = \beta / \beta^* - \sigma_\omega \kappa^2 / \sqrt{\beta^*},$$

d – расстояние до ближайшей стенки канала. Расстояние d от стенки определяется геометрически.

Генерационный член P_k определяется по формуле

$$P_k = \min(\mu_t S^2, 20\beta^* \rho_{sm} k \omega),$$

где $S = \sqrt{2trD^2}$ – второй инвариант тензора скоростей деформаций
 $D = (\nabla V + \nabla V^T) / 2$.

Для определения турбулентной вязкости используется соотношение

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} = \rho \frac{k}{\max(\omega, SF_2 / a_1)},$$

где $a_1 = 0,31$, $\Omega = \sqrt{2trW^2}$ – второй инвариант тензора завихренности
 $W = (\nabla V - \nabla V^T) / 2$.

Для S в выбранной системе координат получим следующее выражение

$$S^2 = 2trD^2 = 2D_{\langle \varphi\varphi \rangle}^2 + 2D_{\langle \psi\psi \rangle}^2 + 2D_{\langle bb \rangle}^2 + 4D_{\langle \varphi\psi \rangle}^2 + 4D_{\langle \varphi b \rangle}^2 + 4D_{\langle \psi b \rangle}^2.$$

Для Ω в выбранной системе координат получим следующее выражение

$$\Omega^2 = 2trW^2 = 2W_{\langle\varphi\psi\rangle}^2 + 4W_{\langle\varphi b\rangle}^2 + 4W_{\langle\psi b\rangle}^2,$$

где

$$\begin{aligned} W_{\langle\varphi\psi\rangle} &= -W_{\langle\psi\varphi\rangle} = \frac{1}{2} \frac{H_\varphi}{b} \left(\frac{\partial}{\partial\psi} \left(\frac{V_{\langle\varphi\rangle}}{H_\varphi} \right) + \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial\psi} \frac{V_{\langle\varphi\rangle}}{H_\varphi} \right) - \frac{1}{2} \frac{b}{H_\varphi} \left(\frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\frac{V_{\langle\psi\rangle}}{b} \right) - \frac{H_\varphi}{b^2} \frac{\partial H_\varphi}{\partial\psi} \frac{V_{\langle\varphi\rangle}}{H_\varphi} \right); \\ W_{\langle\varphi b\rangle} &= -W_{\langle b\varphi\rangle} = \frac{1}{2} \frac{H_\varphi}{1} \left(\frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{V_{\langle\varphi\rangle}}{H_\varphi} \right) + \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} \frac{V_{\langle\varphi\rangle}}{H_\varphi} \right) - \frac{1}{2} \frac{1}{H_\varphi} \left(\frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\frac{V_{\langle b\rangle}}{1} \right) - \frac{H_\varphi}{1^2} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} \frac{V_{\langle\varphi\rangle}}{H_\varphi} \right); \\ W_{\langle\psi b\rangle} &= -W_{\langle b\psi\rangle} = \frac{1}{2} \frac{b}{1} \left(\frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{V_{\langle\psi\rangle}}{b} \right) + \frac{1}{b} \frac{\partial V_{\langle\psi\rangle}}{\partial b} \right) - \frac{1}{2} \frac{1}{b} \left(\frac{\partial}{\partial\psi} \left(\frac{V_{\langle b\rangle}}{1} \right) - \frac{b}{1^2} \frac{V_{\langle\psi\rangle}}{b} \right), \end{aligned}$$

а выражение для $\nabla k \cdot \nabla \omega$ примет вид

$$\frac{1}{H_\varphi^2} \frac{\partial k}{\partial\varphi} \frac{\partial\omega}{\partial\varphi} + \frac{1}{b^2} \frac{\partial k}{\partial\psi} \frac{\partial\omega}{\partial\psi} + \frac{\partial k}{\partial b} \frac{\partial\omega}{\partial b}.$$

В большинстве случаев возникает необходимость учета процессов переноса тепла в стенках теплообменного оборудования.

$$\frac{\partial}{\partial\varphi} \left(\frac{\lambda_w b}{H_\varphi} \frac{\partial T_w}{\partial\varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial\psi} \left(\frac{\lambda_w H_\varphi}{b} \frac{\partial T_w}{\partial\psi} \right) + \frac{\partial}{\partial b} \left(\lambda_w H_\varphi b \frac{\partial T}{\partial b} \frac{\partial T_w}{\partial b} \right) = 0.$$

К представленной системе уравнений необходимо добавить условия однозначности:

– задание расхода Q через поперечное сечение канала

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^R V_{\langle\varphi\rangle} b db d\psi,$$

где R – внутренний радиус канала;

– условия прилипания жидкости на внутренней стенке каналов и условия на стенке канала для k, ω при $\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1, 0 \leq \psi \leq 2\pi, b = R$

$$V_{\langle\varphi\rangle} = V_{\langle\psi\rangle} = V_{\langle b\rangle} = 0, \quad k = 0, \quad \omega = 10 \frac{6\mu}{\rho\beta_1\Delta y_1},$$

где φ_0 – значение координаты φ на входе в канал; φ_1 – значение координаты φ на выходе из канала; Δy_1 – величина первого пристеночного шага сетки;

– условия для k, ω на входе в канал при $\varphi = \varphi_0, 0 \leq \psi \leq 2\pi, 0 \leq b \leq R$

$$\omega = C \frac{\bar{V}}{2R}, \quad k = \bar{\mu}_t \omega,$$

где $C = 1 \div 10$; \bar{V} – среднерасходное значение скорости; $\bar{\mu}_t$ – осредненное по сечению значение турбулентной вязкости;

– условия непрерывности полей температуры и теплового потока на внутренней стенке канала

при $\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1, 0 \leq \psi \leq 2\pi, b = R$

$$T = T_w, \quad -\lambda_f \frac{\partial T}{\partial b} = -\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial b};$$

– граничное условие третьего рода на внешней стенке канала

при $\varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_1, 0 \leq \psi \leq 2\pi, b = R + \delta$

$$-\lambda_f \frac{\partial T}{\partial b} = \alpha \Delta T,$$

где δ – толщина стенки канала;

$$\Delta T = T_o - T_w;$$

T_o – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи, характеризующий теплообмен между стенкой и окружающей средой;

– задание температур жидкости и стенки на входе в канал

при $\varphi = \varphi_0, 0 \leq \psi \leq 2\pi, 0 \leq b \leq R$

$$T = T_0 = const;$$

при $\varphi = \varphi_0, 0 \leq \psi \leq 2\pi, R \leq b \leq R + \delta$

$$T_w = T_0 = const,$$

где T_0 – постоянная температура жидкости и стенки канала;

– на выходе из канала ставятся так называемые мягкие условия

при $\varphi = \varphi_1, 0 \leq \psi \leq 2\pi, 0 \leq b \leq R$

$$V_{\langle\varphi\rangle} = V_{\langle\varphi\rangle 1}(\varphi, \psi, b), V_{\langle\psi\rangle} = V_{\langle\psi\rangle 1}(\varphi, \psi, b), V_{\langle b\rangle} = V_{\langle b\rangle 1}(\varphi, \psi, b), T = T_o,$$

$$k = k_1(\varphi, \psi, b), \omega = \omega_1(\varphi, \psi, b),$$

где величины с индексом 1 относятся к решению задачи при условии изотермичности потока жидкости;

при $\varphi = \varphi_0, 0 \leq \psi \leq 2\pi, R \leq b \leq R + \delta$

$$T_w = T_o = const;$$

– давление жидкости на входе.

Предложенная математическая модель является универсальной, позволяющей описать процессы сопряженного теплообмена в целом классе змеевиковых аппаратов:

– в случае изменяющегося радиуса изгиба винтовой трубы $a = a(\varphi)$ – в аппарате на конус;

– при $a(\varphi) = const$ – в цилиндрическом аппарате.

Разработанная математическая модель позволит исследовать сложную гидродинамическую обстановку и процесс теплообмена в змеевиковых аппаратах как с изменяющимся, так и неизменяющимся радиусом изгиба винтовой трубы.

Расчеты, проведенные на основании предложенной модели, позволили определить гидродинамические и температурные поля, перепады давления, необходимые для разработки надежных методов инженерного расчета змеевиковых теплообменных аппаратов типа «труба в трубе».

На рис. 60–64 показаны распределения основных гидродинамических характеристик потока в поперечном сечении змеевика.

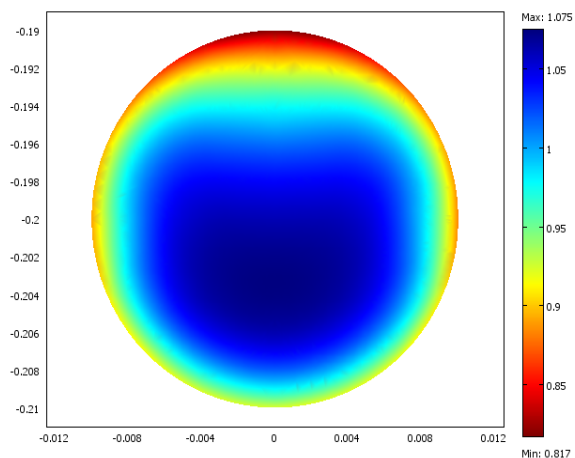


Рис. 60. Распределение продольной составляющей скорости

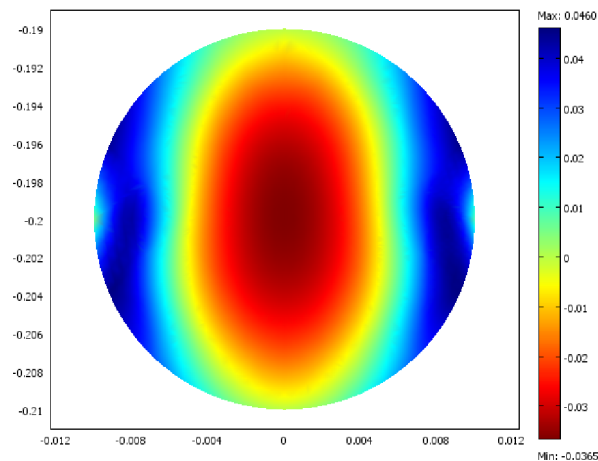


Рис. 61. Распределение поперечной составляющей скорости

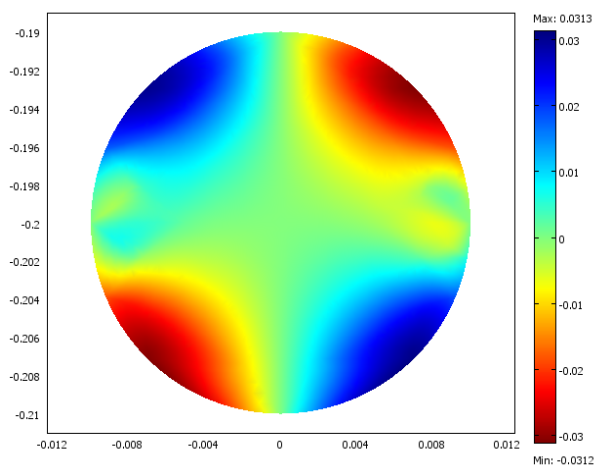


Рис. 62. Распределение вертикальной составляющей скорости

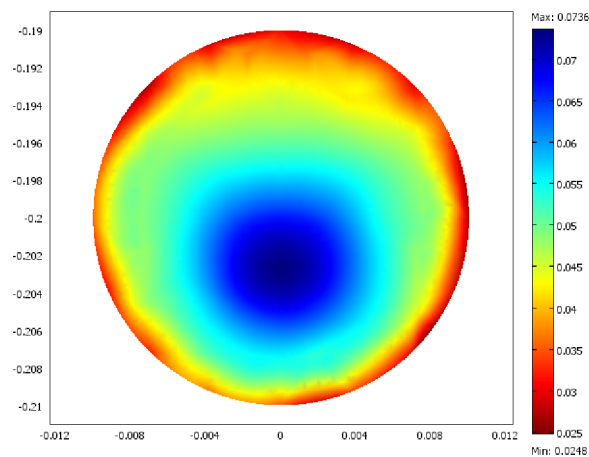
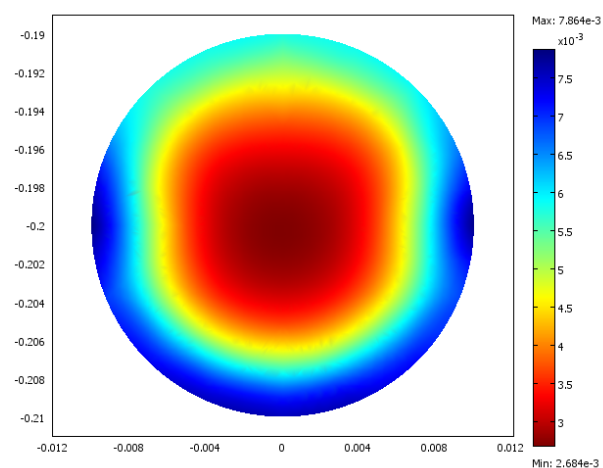
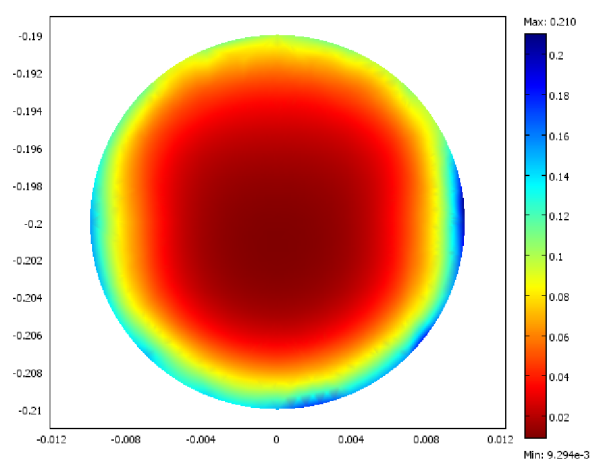


Рис. 63. Распределение турбулентной вязкости



а)



б)

Рис. 64. Распределение кинетической энергии турбулентности (а);
распределение скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (б)

Глава пятая

ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

5.1. Общий метод описания поверхностей теплообмена

Поверхности и их описание играют важную роль в конструировании и последующем производстве. Некоторыми примерами этого являются разработка и производство строительных конструкций, теплообменных аппаратов, компрессоров и лопастей вентиляторов, насосов и др. В этом случае сущность конструирования либо по функциональным, либо по эстетическим причинам составляет форма или геометрия поверхности.

Традиционным способом представления поверхности является использование нескольких ортогональных проекций. В этом случае поверхность задается сеткой ортогональных плоских кривых, лежащих на секущих плоскостях, и несколькими ортогональными проекциями определенных «характерных» пространственных линий. Однако в настоящее время в связи с развитием и повсеместным распространением вычислительной техники широкое применение в практике находит и аналитический способ задания поверхности, позволяющий относительно легко провести анализ характеристик поверхности, например, кривизны, или физических количественных характеристик, зависящих от поверхности, например, объема, площади поверхности, момента инерции и т.д. Упрощается визуализация поверхности, применяемая для разработки, так как при аналитическом представлении поверхности можно точно определить положение любой точки. Кроме того, аналитический способ задания поверхности используется при проектировании поверхностей различных форм и их воспроизведении на станках с числовым программным управлением.

Простейшими способами получения поверхности являются вращение двумерного объекта, например, прямой или плоской кривой вокруг оси в пространстве, или перемещение объекта, например, отрезка, ломаной или кривой вдоль некоторой линии в пространстве. Такие поверхности называются поверхностями вращения и заметающими поверхностями, соответственно. Примерами поверхностей вращения могут служить сфера, конус, цилиндр, эллипсоид и т.д.

Для создания заметающих поверхностей используются замкнутые и незамкнутые ломаные и кривые. При добавлении концевых поверхностей заметающая поверхность ограничивает конечный объем в пространстве. Перемещаемый вдоль прямой направляющий квадрат или прямоугольник порождает прямоугольный параллелепипед. Окружность, перемещаемая вдоль прямой направляющей, порождает цилиндр. Окружность с уменьшающимся радиусом, перемещаемая вдоль прямой направляющей, порождает конус. Этот способ создания поверхности лег в основу метода, позволяющего описать поверхности теплообменных элементов различных конфигураций.

Запишем уравнение поверхности, образованной движением непрерывной замкнутой кривой ρ , вдоль некоторой криволинейной направляющей γ .

Пусть $\gamma: \vec{r} = \vec{r}(t)$ – направляющая кривая, t – некоторый параметр кривой, принадлежащий множеству действительных чисел; $\rho: \rho = \rho(t, \varphi)$ – плоская кривая, заданная в полярной системе координат, φ – полярный угол в нормальной плоскости кривой γ , отсчитываемый от главной нормали по направлению к бинормали, $\varphi \in [\alpha, \beta]$.

Векторное уравнение кривой $\rho: \rho = \rho(t, \varphi)$ записывается в виде

$$\vec{\rho}(t, \varphi) = \rho(t, \varphi) \cos \varphi \cdot \vec{v}(t) + \rho(t, \varphi) \sin \varphi \cdot \vec{\beta}(t). \quad (5.1)$$

Представим радиус-вектор точки поверхности в виде суммы (рис. 65):

$$\vec{R}(t, \varphi) = \vec{r}(t) + \vec{\rho}(t, \varphi).$$

Тогда, с учетом (5.1), векторно-параметрическое уравнение поверхности запишется в виде

$$\vec{R}(t, \varphi) = \vec{r}(t) + \rho(t, \varphi) \cos \varphi \cdot \vec{v}(t) + \rho(t, \varphi) \sin \varphi \cdot \vec{\beta}(t), \quad (5.2)$$

где $\vec{v}(t)$ и $\vec{\beta}(t)$ – единичные векторы главной нормали и бинормали в точке, соответствующей значению параметра t .

Единичные векторы касательной $\vec{\tau}$, нормали \vec{v} и бинормали $\vec{\beta}$ образуют подвижный ортогональный базис, перемещающийся вдоль кривой

$$\gamma: \vec{r} = \vec{r}(t),$$

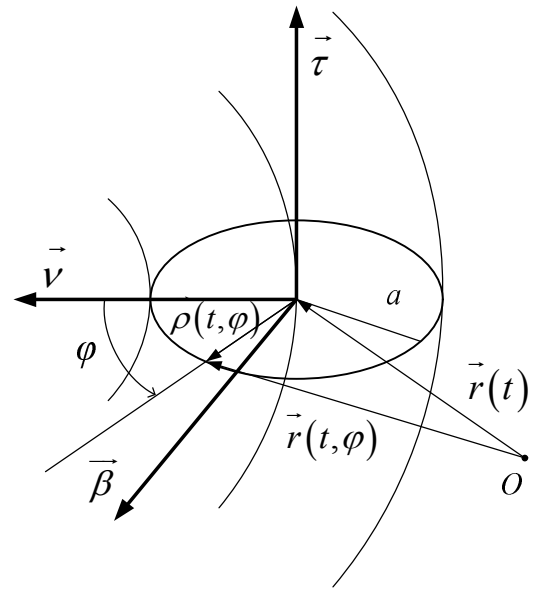


Рис. 65. Схема описания поверхности

и вычисляются по формулам [177]:

$$\vec{\tau} = \frac{\vec{r}'}{|\vec{r}'|}, \quad \vec{\beta} = \frac{[\vec{r}', \vec{r}'']}{|[\vec{r}', \vec{r}'']|}, \quad \vec{v} = [\vec{\beta}, \vec{\tau}] = \frac{[[\vec{r}', \vec{r}''], \vec{r}']}{|[\vec{r}', \vec{r}'']| |\vec{r}'|}. \quad (5.3)$$

5.2. Прямолинейные пружинно-витые каналы

Запишем поверхность теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки эллиптического сечения на эллиптический цилиндр.

В качестве направляющей кривой выберем винтовую линию, расположенную на поверхности эллиптического цилиндра

$$\gamma: x = r_0 \cos t, \quad y = r_1 \sin t, \quad z = bt,$$

а в качестве образующей – эллипс, с полуосями, равными c и d .

Здесь t – параметр, характеризующий положение точки на винтовой линии ($0 \leq t \leq 2\pi n$); n – число витков; b – параметр, определяющий расстояние между витками винтовой линии.

Тогда

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_1 \sin t \\ bt \end{pmatrix}, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n, \quad \rho(t, \varphi) = \begin{pmatrix} c \cos \varphi \\ d \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix}, \quad 0 \leq \varphi \leq 2\pi. \quad (5.4)$$

Вычислим единичные векторы касательной, нормали и бинормали по формулам (5.2):

$$\begin{aligned} \vec{\tau} &= \frac{1}{\sqrt{n(t)}} \begin{pmatrix} -r_0 \sin t \\ r_1 \cos t \\ b \end{pmatrix}, \quad \vec{\beta} = \frac{1}{\sqrt{m(t)}} \cdot \begin{pmatrix} r_1 b \sin t \\ -r_0 b \cos t \\ r_0 r_1 \end{pmatrix}, \\ \vec{v} &= \frac{1}{\sqrt{p(t)}} \begin{pmatrix} -r_0(b^2 + r_1^2) \cos t \\ -r_1(b^2 + r_0^2) \sin t \\ b(r_1^2 - r_0^2) \cos t \cdot \sin t \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (5.5)$$

где $n(t) = r_0^2 \sin^2 t + r_1^2 \cos^2 t + b^2$, $m(t) = r_1^2 b^2 \sin^2 t + r_0^2 b^2 \cos^2 t + r_0^2 r_1^2$,

$$p(t) = \left(r_0(b^2 + r_1^2) \cos t \right)^2 + \left(r_1(b^2 + r_0^2) \sin t \right)^2 + \left(b(r_1^2 - r_0^2) \cos t \cdot \sin t \right)^2.$$

Подставляя выражения (5.5) в формулу (5.2), получим параметрические уравнения поверхности теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки эллиптического сечения на эллиптический цилиндр:

$$\vec{R}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_1 \sin t \\ bt \end{pmatrix} + \frac{c \cos \varphi}{\sqrt{p(t)}} \begin{pmatrix} -r_0(b^2 + r_1^2) \cos t \\ -r_1(b^2 + r_0^2) \sin t \\ b(r_1^2 - r_0^2) \cos t \cdot \sin t \end{pmatrix} + \frac{d \sin \varphi}{\sqrt{m(t)}} \cdot \begin{pmatrix} r_1 b \sin t \\ -r_0 b \cos t \\ r_0 r_1 \end{pmatrix}, \quad (5.6)$$

$0 \leq \varphi \leq 2\pi$, $0 \leq t \leq 2\pi n$, n – число витков винтовой линии.

Для плотного прилегания витков пружины параметр винтовой линии

$$b = \frac{r_1}{\pi}.$$

Из (5.6) можно получить уравнение поверхности теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки эллиптического сечения на круглый цилиндр при $r_0 = r_1$:

$$\vec{R}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_0 \sin t \\ bt \end{pmatrix} + c \cos \varphi \begin{pmatrix} -\cos t \\ -\sin t \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{d \sin \varphi}{\sqrt{b^2 + r_0^2}} \cdot \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r_0 \end{pmatrix}, \quad (5.7)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n;$$

уравнение поверхности теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки круглого сечения на эллиптический цилиндр при $c = d$:

$$\vec{R}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_1 \sin t \\ bt \end{pmatrix} + \frac{c \cos \varphi}{\sqrt{p(t)}} \begin{pmatrix} -r_0(b^2 + r_1^2) \cos t \\ -r_1(b^2 + r_0^2) \sin t \\ b(r_1^2 - r_0^2) \cos t \cdot \sin t \end{pmatrix} + \frac{c \sin \varphi}{\sqrt{m(t)}} \cdot \begin{pmatrix} r_1 b \sin t \\ -r_0 b \cos t \\ r_0 r_1 \end{pmatrix}, \quad (5.8)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n;$$

уравнение поверхности теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки круглого сечения на круглый цилиндр при $c = d$ и $r_0 = r_1$:

$$\vec{R}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_0 \sin t \\ bt \end{pmatrix} + c \cos \varphi \begin{pmatrix} -\cos t \\ -\sin t \\ 0 \end{pmatrix} + \frac{c \sin \varphi}{\sqrt{b^2 + r_0^2}} \cdot \begin{pmatrix} b \sin t \\ -b \cos t \\ r_0 \end{pmatrix}, \quad (5.9)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n.$$

С целью проверки соответствия полученных уравнений геометрии рассматриваемых теплообменных элементов, разработаны программы и построены поверхности в системе Matlab.

В качестве примера на рис. 66 показана поверхность теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки круглого сечения на круглый цилиндр, построенная в системе Matlab.

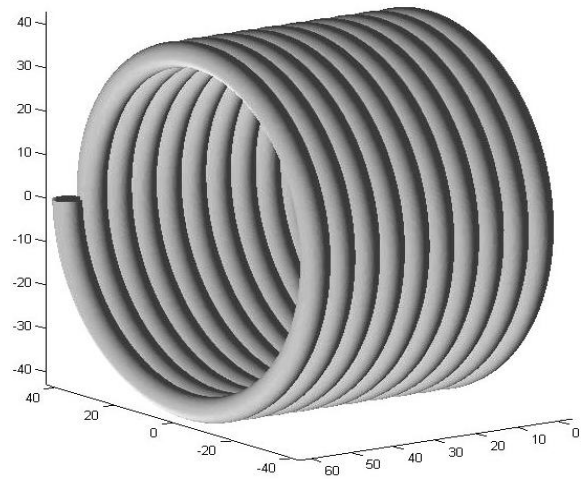


Рис. 66. Пружинно-витой канал, построенный в системе Matlab

Аналогично можно записать уравнения поверхности теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки многоугольного сечения на эллиптический цилиндр.

В качестве направляющей кривой выберем винтовую линию, расположенную на поверхности эллиптического цилиндра

$$\gamma : x = r_0 \cos t, y = r_1 \sin t, z = bt,$$

а в качестве образующей – правильный N -угольник [178]:

$$\rho(t, \varphi) = \frac{c \cos(\pi/N)}{\cos(\varphi - (2k+1)\pi/N)}, \quad (5.10)$$

$$\frac{2\pi k}{N} \leq \varphi \leq \frac{2\pi(k+1)}{N}, \quad k = \overline{0, N-1}.$$

Здесь c – радиус окружности, описанной около N -угольника (рис. 67).

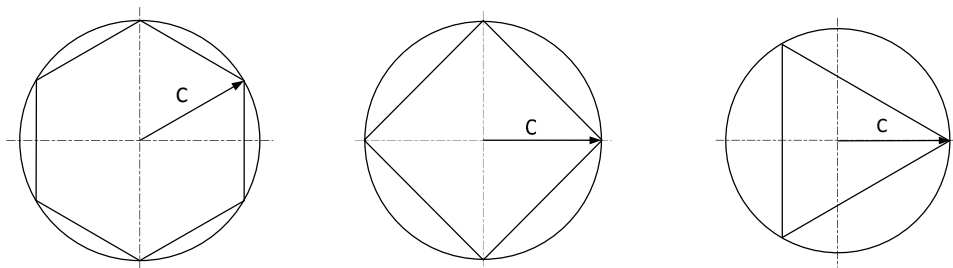


Рис. 67. Сечение проволоки при $N = 6$, $N = 4$, $N = 3$

При $N = 3$ получаем равносторонний треугольник:

$$\rho(t, \varphi) = \frac{c}{2 \cos(\varphi - (2k+1)\pi/3)}, \quad k = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq \varphi \leq 2\pi/3; \\ 1, & \text{если } 2\pi/3 \leq \varphi \leq 4\pi/3; \\ 2, & \text{если } 4\pi/3 \leq \varphi \leq 2\pi. \end{cases} \quad (5.11)$$

При $N = 4$ получаем квадрат:

$$\rho(t, \varphi) = \frac{c}{\sqrt{2} \cos(\varphi - (2k+1)\pi/4)}, \quad k = \begin{cases} 0, & \text{если } 0 \leq \varphi \leq \pi/2; \\ 1, & \text{если } \pi/2 \leq \varphi \leq \pi; \\ 2, & \text{если } \pi \leq \varphi \leq 3\pi/2; \\ 3, & \text{если } 3\pi/2 \leq \varphi \leq 2\pi. \end{cases} \quad (5.12)$$

Подставляя выражения (5.5) и (5.10) в формулу (5.2), получим параметрические уравнения поверхности теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки многоугольного сечения на эллиптический цилиндр:

$$\begin{aligned} \vec{R}(t, \varphi) = & \begin{pmatrix} r_0 \cos t \\ r_1 \sin t \\ bt \end{pmatrix} + \frac{1}{\sqrt{p(t)}} \cdot \frac{c \cos(\pi/N) \cos \varphi}{\cos(\varphi - (2k+1)\pi/N)} \begin{pmatrix} -r_0(b^2 + r_1^2) \cos t \\ -r_1(b^2 + r_0^2) \sin t \\ b(r_1^2 - r_0^2) \cos t \cdot \sin t \end{pmatrix} + \\ & + \frac{1}{\sqrt{m(t)}} \cdot \frac{c \cos(\pi/N) \sin \varphi}{\cos(\varphi - (2k+1)\pi/N)} \begin{pmatrix} r_1 b \sin t \\ -r_0 b \cos t \\ r_0 r_1 \end{pmatrix}, \quad \frac{2k\pi}{N} \leq \varphi \leq \frac{(2k+1)\pi}{N}, \\ & k = \overline{0, N-1}. \end{aligned} \quad (5.13)$$

Параметр винтовой линии необходимо выбирать таким образом, чтобы витки проволоки плотно прилегали друг к другу. Например, при $N=3$ и $N=4$ параметр $b = \frac{c\sqrt{N}}{2\pi}$.

Чтобы получить уравнения поверхности теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки многоугольного сечения на круглый цилиндр, достаточно в формулу (5.13) подставить $r_0 = r_1$.

На рис. 68 показана поверхность теплообменного элемента, полученного путем намотки проволоки квадратного сечения на круглый цилиндр и фрагмент проволоки квадратного сечения.

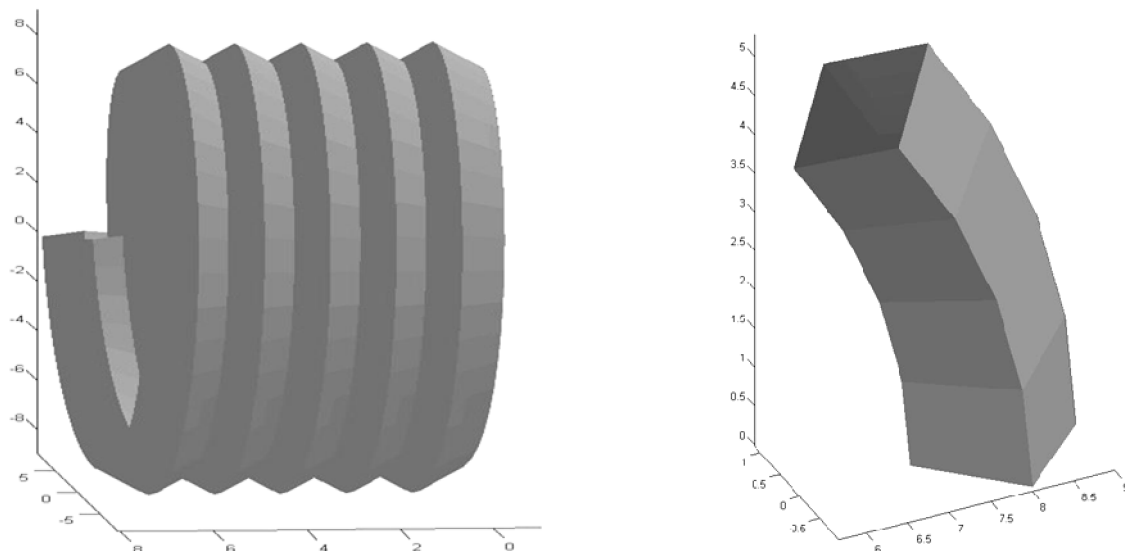


Рис. 68. Пружинно-витой канал из проволоки квадратного сечения, построенный в системе Matlab

5.3. Конические пружинно-витые каналы и пружинно-витые каналы типа «конфузор-диффузор»

Для описания поверхности пружинно-витого канала, выполненного на конус, в качестве направляющей кривой выберем винтовую линию, расположенную на поверхности усеченного кругового конуса

$$\gamma: x = (r_0 + bt \operatorname{tg} \psi) \cos t, y = (r_0 + bt \operatorname{tg} \psi) \sin t, z = bt, t \in [0; 2\pi n],$$

где ψ – угол раствора конуса; r_0 – радиус основания конуса (рис. 69); n – число витков винтовой линии, а в качестве образующей – окружность радиуса c .

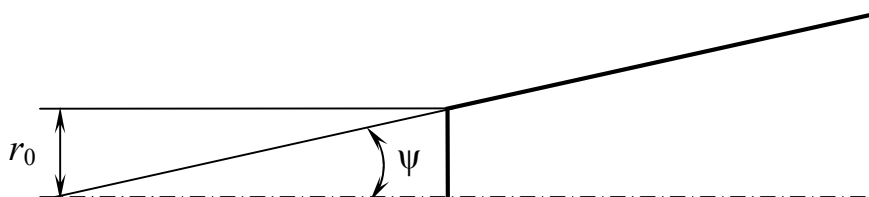


Рис. 69. Фрагмент усеченного конуса

Тогда уравнение (5.2) примет вид:

$$\begin{aligned} \vec{R}(t, \varphi) = & \begin{pmatrix} (r + bt \operatorname{tg} \psi) \cos t \\ (r + bt \operatorname{tg} \psi) \sin t \\ bt \end{pmatrix} + \frac{c \cos \varphi}{\sqrt{p(t)}} \begin{pmatrix} -r_0(b^2 + r_1^2) \cos t \\ -r_1(b^2 + r_0^2) \sin t \\ b(r_1^2 - r_0^2) \cos t \cdot \sin t \end{pmatrix} + \\ & + \frac{c \sin \varphi}{\sqrt{m(t)}} \cdot \begin{pmatrix} r_1 b \sin t \\ -r_0 b \cos t \\ r_0 r_1 \end{pmatrix}, 0 \leq \varphi \leq 2\pi, 0 \leq t \leq 2\pi n. \end{aligned} \quad (5.14)$$

Для плотного прилегания витков параметр винтовой линии $b = \frac{r_0}{\pi}$.

Уравнение (5.14) может быть использовано и для описания пружинно-витых каналов типа «конфузор-диффузор», если принять для диффузора угол конусности $\psi = \psi_d$, радиус «входного» сечения $r_0 = r_d$, а для конфузора – $\psi = \psi_k$, $r = r_k$.

С целью проверки полученных уравнений построена поверхность пружинно-витого канала типа «конфузор-диффузор» в системе Matlab (рис. 70). Следует отметить, что при $\psi = 0$ уравнение (5.14) опишет прямолинейный пружинно-витой канал.

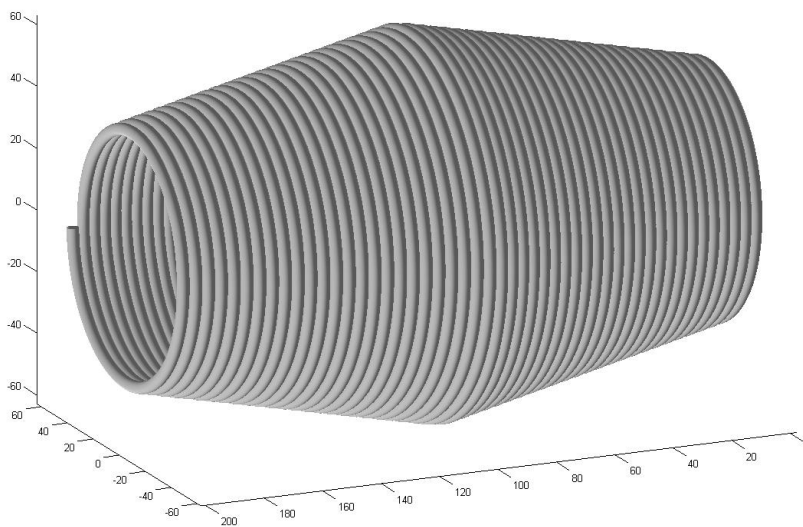


Рис. 70. Пружинно-витой канал типа «конфузор-диффузор», построенный в системе Matlab

5.4. Змеевиковый пружинно-витой канал

Для описания поверхности теплообмена змеевикового пружинно-витого канала в качестве направляющей кривой выберем двойную винтовую линию γ (биспираль, рис. 71), заданную уравнением:

$$x = (R + r \cos \omega t) \cos t, \quad y = (R + r \cos \omega t) \sin t, \quad z = bt + r \sin \omega t,$$

а в качестве образующей – эллипс, с полуосями, равными c и d .

Тогда

$$\vec{r}(t) = \begin{pmatrix} (R + r \cos \omega t) \cos t \\ (R + r \cos \omega t) \sin t \\ bt + r \sin \omega t \end{pmatrix}, \quad \rho(t, \varphi) = \begin{pmatrix} c \\ d \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (5.15)$$

$$0 \leq \varphi \leq 2\pi, \quad 0 \leq t \leq 2\pi n,$$

где n – число витков двойной винтовой линии; R – радиус змеевика; r – радиус пружинно-витого канала.

Вычисляя единичные векторы касательной, нормали и бинормали по формулам (5.3) и подставляя полученные выражения в формулу (5.2), получим параметрические уравнения поверхности змеевикового пружинно-витого канала:

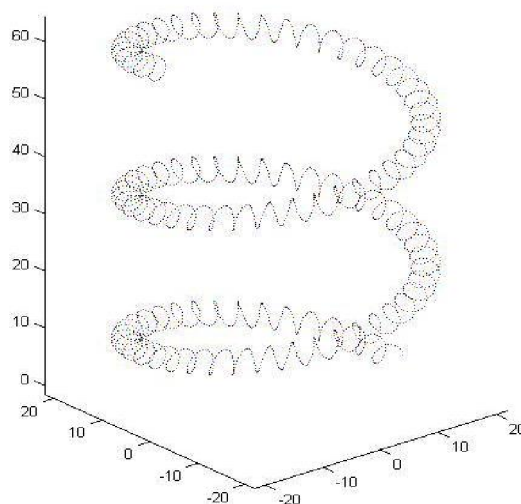


Рис. 71. Двойная винтовая линия

$$\vec{r}(t, \varphi) = \begin{pmatrix} (R + r \cos \omega t) \cos t \\ (R + r \cos \omega t) \sin t \\ bt + r \sin \omega t \end{pmatrix} + c \cos \varphi \cdot \vec{v}(t) + d \sin \varphi \cdot \vec{\beta}(t). \quad (5.16)$$

С целью проверки соответствия уравнения (5.16) геометрии рассматриваемого змеевикового пружинно-витого канала написана программа и построена поверхность (рис. 72) в системе Matlab.

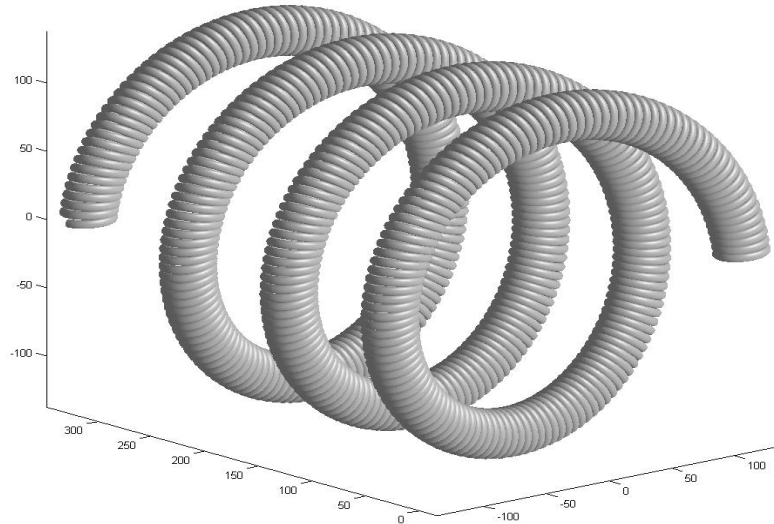


Рис. 72. Змеевиковый пружинно-витой канал

```
% Построение поверхности змеевикового пружинно-витого канала
r=15; % Радиус пружинно-витого канала
R=120; % Радиус змеевика
b=15; % Параметр винтовой линии змеевика
c=3; d=3; % Полуоси эллипса (сечение проволоки)
omega=ceil(pi*R/d) % Число витков проволоки
syms t fi % задаем символьные переменные
ro=[c*cos(fi); d*sin(fi); 0];
r_t=[(R+r*cos(t*omega)).*cos(t);(R+r*cos(t*omega)).*sin(t);b*t+r*sin(t*omega)];
% Вычисление единичных векторов
dr=diff(r_t,t); dlina_dr=sqrt(dr(1)^2+dr(2)^2+dr(3)^2);
tau=dr/dlina_dr; dr2=diff(dr,t); bet=cross(dr,dr2);
dlina_bet=sqrt(bet(1)^2+bet(2)^2+bet(3)^2); betta=bet/dlina_bet;
nu=cross(betta,tau); % Векторное произведение
r_tfi=r_t+ro(1).*nu+ro(2).*betta; % Радиус-вектор поверхности
t=[0*pi:pi/2000:7*pi]; % Строим поверхность
fi=[0:pi/80:2*pi];
[t,fi]=meshgrid(t,fi);
x=eval(r_tfi(1)); y=eval(r_tfi(2)); z=eval(r_tfi(3)); surf(x,z,y);
axis('equal') % оси равномерные
shading interp
colormap(gray)
hold off;
```


Глава шестая

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИННО-ВИТЫХ КАНАЛОВ

Для производства пружинно-витых каналов [88–95], применяемых в кожухотрубчатых теплообменниках и в аппаратах змеевикового типа [90; 91; 96–98], важным этапом является разработка современного способа их изготовления и выбор соответствующего оборудования.

В настоящее время на большинстве предприятий машиностроения узлы теплообменного оборудования изготавливаются с помощью полуавтоматической сварки в среде защитного газа. В связи с необходимостью сокращения длительности технологического цикла сварки, оптимизации ее режимов и снижения себестоимости процесса, возникает потребность замены существующего способа сварки на более передовой производительный и качественный способ ее реализации, например, путем промышленного освоения и реализации технологии лазерной сварки [6; 12–15; 85; 99; 100].

Известно, что лазерная сварка характеризуется наименьшим тепловложением в свариваемую деталь по сравнению с другими способами сварки. Поэтому ее применение должно быть целесообразно с точки зрения как остаточных напряжений и деформаций, так и внешнего вида сварного соединения.

Любое сравнение лазерной сварки с другими способами является достаточно условным, поскольку каждый из методов имеет свои определенные преимущества и недостатки, которые определяют области оптимального технико-экономического применения.

Преимущество лазерной сварки заключается в следующем.

- За счет высокой концентрации энергии и малой площади пятна нагрева объем сварочной ванны при лазерной сварке в несколько раз меньше, что положительно сказывается на характеристиках сварного шва и

изделия в целом. Уменьшение объема расплава и получение швов с большим отношением глубины проплавления к ширине шва дает возможность снизить до 10 раз деформации деталей. Это в свою очередь приводит к значительной экономии металла (за счет уменьшения допусков), к повышению производительности (в результате экономии времени на правку после сварки), а также к исключению послесварочной механической обработки. Малый объем расплавленного металла и специфическая форма шва также улучшают условия кристаллизации, что повышает технологическую прочность и механические свойства сварных соединений.

- Отсутствие электрода, близко расположенного к поверхности сварочной ванны, исключает попадание в нее инородных материалов.

- Острая фокусировка луча и возможность передачи его на значительные расстояния позволяют осуществлять сварку в труднодоступных местах.

- Термический цикл лазерной сварки характеризуется высокими скоростями нагрева и охлаждения, что уменьшает зону термического влияния, снижая при этом эффект фазовых и структурных превращений в околошовной зоне, приводящих к разупрочнению материала, трещинообразованию, снижению коррозионной стойкости и т.д.

- Большие скорости сварки (до 9–11 м/мин.) обеспечивают высокую производительность процесса, в десятки раз превышающую производительность дуговой сварки.

- Сварные швы при лазерной сварке качественные и практически не имеют дефектов.

- Использование передачи энергии по световоду при сварке твердотельными лазерами позволяет автоматизировать или роботизировать процесс и проводить его в различных пространственных положениях.

Все эти преимущества делают лазерную сварку экономически более выгодной, по сравнению с дуговой, несмотря на высокую стоимость лазерного оборудования.

Для отработки технологии лазерной сварки пружинно-витых труб применяются образцы-свидетели [101]. Образец-свидетель представляет собой трубу длиной 100 мм. Внешний вид образца-свидетеля показан на рис. 73.

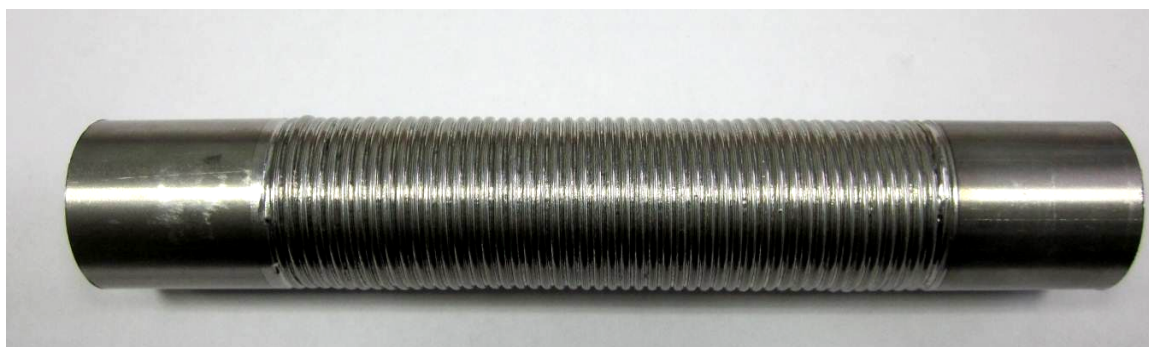


Рис. 73. Внешний вид образца-свидетеля пружинно-витого канала теплообменного аппарата

Особенностью лазерной сварки пружинно-витых труб является необходимость учета поле доступа на размер диаметра проволоки, от которого зависит погрешность шага между витками, в последующем накапливаемой по длине канала. Данная особенность обуславливает необходимость точного наведения луча лазера на стык витка. При этом ось лазерного луча направляется и фокусируется линзой на стык витка таким образом, что положение фокальной плоскости по отношению к свариваемой поверхности располагают из условия

$$S < d_n < 2S,$$

где S – зазор между свариваемыми витками; d_n – диаметр пятна сфокусированного лазерного излучения.

Кроме того, для получения качественного сварного соединения витков пружинно-витого канала процесс изготовления осуществляют

последовательно в два этапа: навивку пружины и последующую сварку. При этом необходимо контролировать максимальный зазор между витками пружины (менее 0,1 мм), колебание диаметра витков пружины по длине трубы.

При этом плотность мощности W_c выбирают из условий требуемой глубины проплавления и необходимых механических свойств сварного шва, а именно

$$W_n \leq W_c \leq W_{кр},$$

где W_n – пороговая плотность мощности лазерного излучения в зоне сварки, при которой происходит расплавление свариваемого металла; $W_{кр}$ – критическая плотность мощности лазерного излучения в зоне сварки, которая характеризует начало перехода параметров лазерной сварки из режима теплопроводности в режим глубокого проплавления.

Во время сварки совершают одновременное поступательное движение оптической лазерной головки и вращательное движение свариваемой заготовки. Соотношение между угловой и линейной скоростями выбирают таким образом, что момент образования стыка сварного соединения совпадает с моментом воздействия луча лазера. Сварку производят в среде защитного газа – аргона.

В настоящее время разработана конструкция специализированной установки для сварки пружинно-витых труб (рис. 74) [102].

Преимуществом предлагаемой установки является возможность получения на ней длинномерных изделий с высоким качеством сварного шва и необходимыми потребительскими свойствами.

Установка включает в себя станок 1 для навивки пружинно-витого канала, резцедержатель 2 для торцевого среза пружинно-витого канала 3 заданной длины, направляющей 4 с пазами, смонтированными под углом

90° относительно друг друга и заполненной шариками 5 для эффекта трения-качения при движении пружинно-витого канала 3 в полую трубу 4.

В состав установки входит устройство для плотной фиксации витков свариваемой трубы, состоящее из подвижной консоли 6, двух подпружиненных клиновидных роликов 7, 8, а также рабочего сварочного элемента 9, размещенного между клиновидными роликами 7, 8.

Кроме того, установка для лазерной сварки пружинно-витого канала снабжена механизмом реверсивного вращения 10 сваренной трубы 11, включающим полуу трубы 12, связанную через клиноременную передачу 13 с реверсивным двигателем 14, и винтовой элемент 15, установленный в полости трубы 11. Винтовой элемент 15 выполнен с шагом и профилем, соответствующим поверхности сваренного пружинно-витого канала 11.

Установка работает следующим образом. Навиваемый на станке 1 пружинно-витой канал 3 непрерывно подается в направляющую 4, снабженную пазами, смонтированными под углом 90° относительно друг друга, заполненную шариками 5. Пазы в направляющей 4 имеют размеры, позволяющие выступать шарикам 5 за поверхность направляющей и обеспечивают эффект трения-качения при движении пружинно-витого канала 3. Кроме того, шарики фиксируют пружинно-витой канал строго по направляющей 4, что обеспечивает высокое качество лазерной сварки.

Продвигаемый по направляющей 4 (под действием усилий станка 1) пружинно-витой канал 3 перед сваркой направляется в устройство для плотной фиксации витков. При этом по ходу движения заготовки с одной стороны подпружиненный клиновидный ролик 7, установленный на консоли 6, плотно внедряется на 3/4 диаметра пружинно-витого канала и поджимает 2..3 витка трубы к подпружиненному ролику 8, внедренному на глубину 1/4 диаметра пружинно-витого канала.

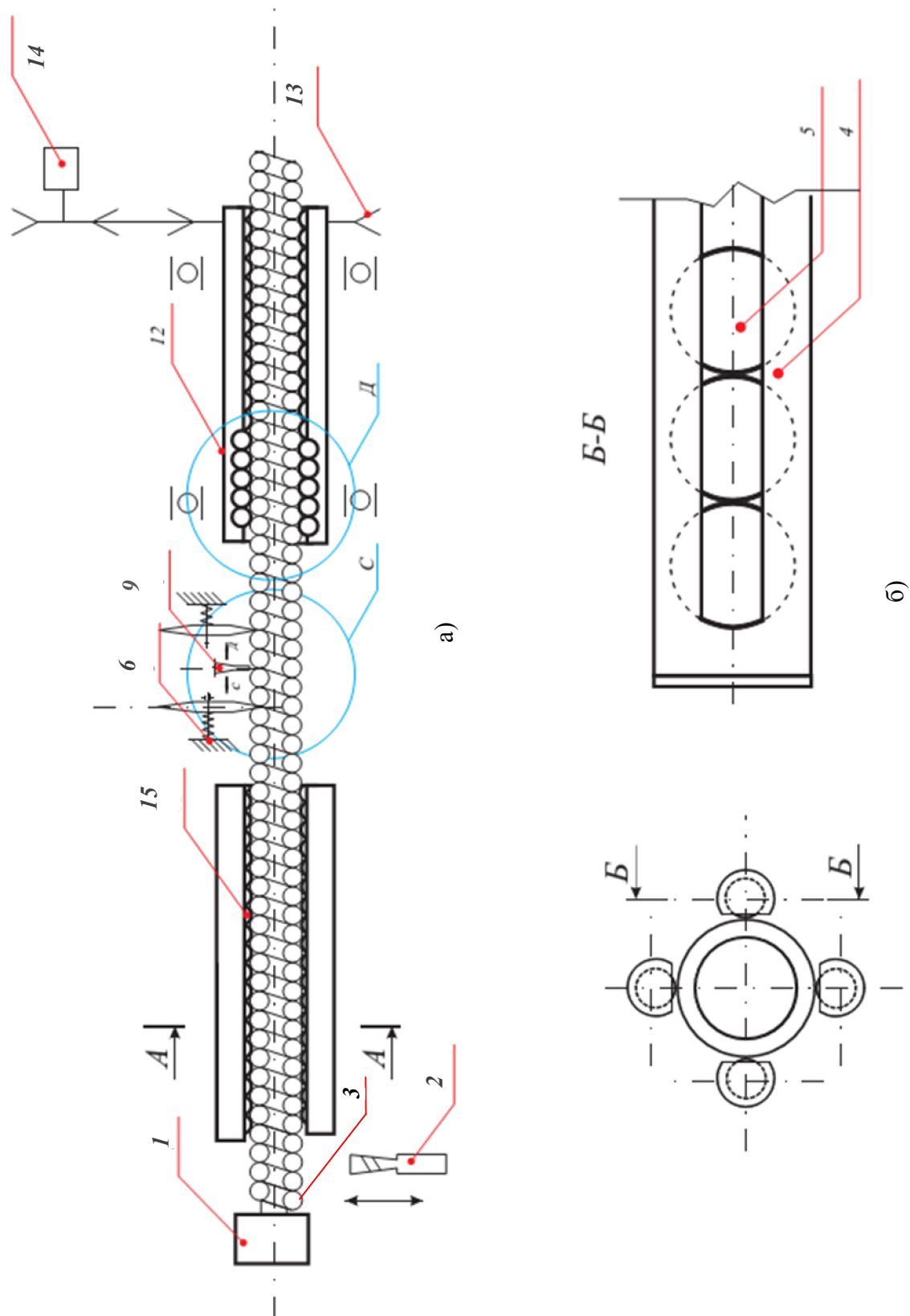


Рис. 74. Установка лазерной сварки пружинно-витых труб:
 а) установка; б) направляющие пружины, выполнены из полых труб с шариками

В промежутке между подпружиненными клиновидными роликами 7 и 8, с помощью элемента 9, при вращении пружинно-витого канала производят сварку витков (рис. 75).

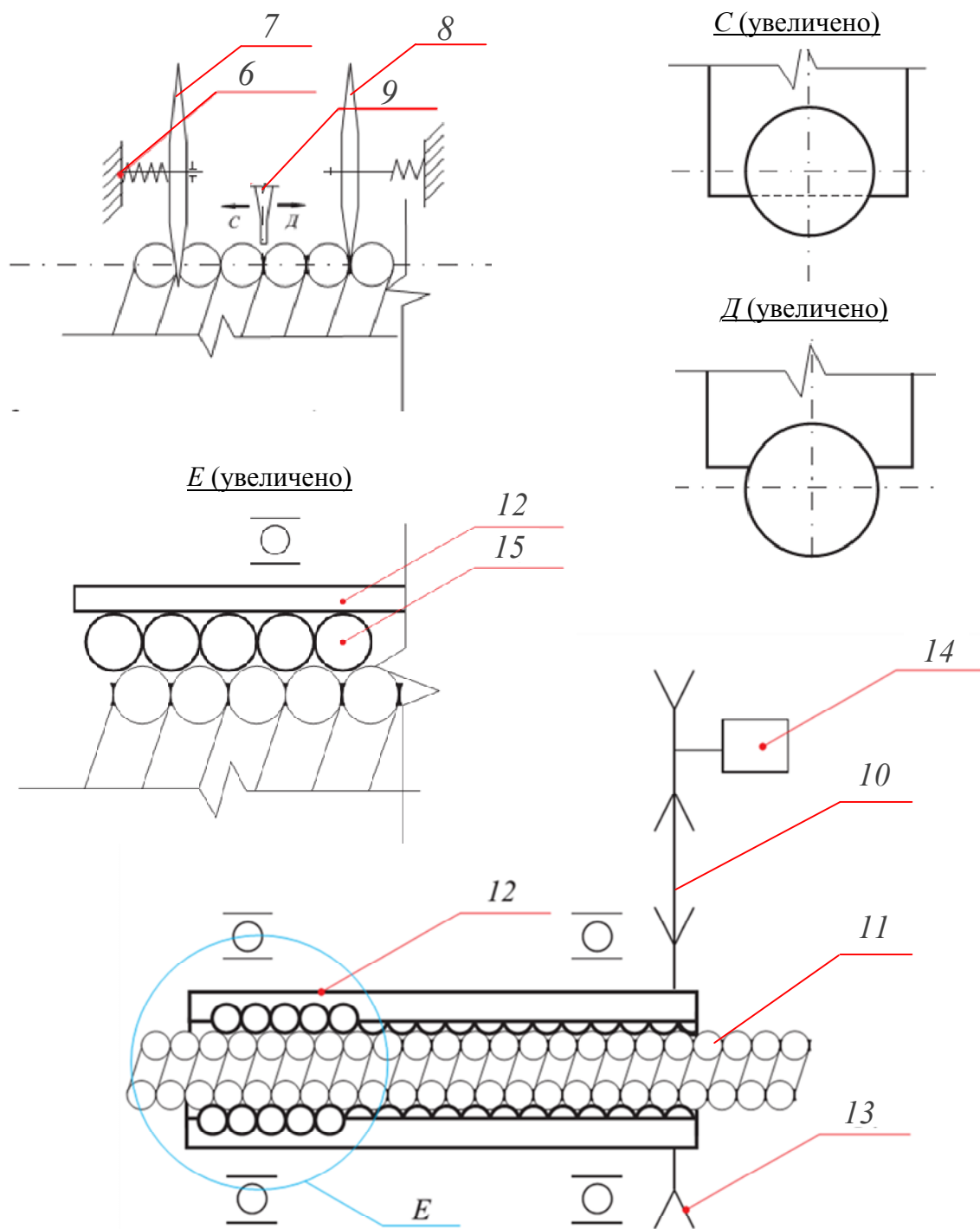


Рис. 75. Устройство плотного фиксирования витков пружины

Одновременно (в пространстве между станком 1 и направляющей 4) резцом, установленным на резцедержателе 2, сваренная труба согласно заданному размеру отрезается.

При этом сама проволока постоянно поступает в установку лазерной сварки, что обеспечивает непрерывность процесса производства труб.

Для производства пружинно-витого канала центральным вопросом технологии является определение режимов лазерной сварки, в частности, мощность луча лазера – мощность его излучения, определяющая воздействие лазерного излучения на материал в процессе сварки. Мощность излучения влияет на проплавляющую способность и характер формирования шва. Ее можно вычислить из эмпирической формулы для нахождения глубины проплавления [13; 103; 104]:

$$h = \frac{P}{2\pi\lambda_T T_{pl}} \ln \frac{r_p + a / v_{cv}}{r_p}, \quad P = \frac{h \cdot 2\pi\lambda_T \cdot T_{pl}}{\ln \frac{r_p + a / v_{cv}}{r_p}},$$

где T_{pl} – температура плавления, К; λ_T – коэффициент теплопроводности, Вт/(см·К); r_p – радиус сфокусированного пучка, см; a – коэффициент температуропроводности, см²/с; v_{cv} – скорость сварки, см/с.

Скорость сварки выбирается исходя из требуемой глубины проплавления.

Для оценки значения мощности лазерного излучения, необходимого для сварки пружинно-витых каналов, было проведено математическое моделирование технологического процесса [103].

Моделирование процессов лазерной сварки и последующее численное решение позволяют определить оптимальные режимы сварки и сократить расходы на выполнение опытных работ.

При воздействии сварочного источника в металле возбуждаются процессы тепло- и массопереноса, которые определяют изменение

структуры металла, фазовые переходы и динамику напряженно-деформированного состояния [104].

Основными параметрами теплового процесса при сварке являются температура $T(x, y, z, t)$ и плотность мощности концентрированного источника энергии $q(x, y, z, t)$ (электрической дуги, потока электронов, излучения лазера, низкотемпературной плазмы, газового пламени и т.д.).

Параметры T и q распределены в пространстве, заданном декартовыми координатами x , y , z , и во времени t , поэтому процесс теплопереноса является системой с распределенными параметрами.

В теории сварочных процессов разработаны методы расчета, основанные на решении прямой задачи теплопроводности, а вычислительный эксперимент – на построении графической зависимости распределения температуры в пространстве и времени при заданном источнике нагрева. Модель источника строится в соответствии с выбранной схемой, а выбор режима сварки ограничивается набором расчетных схем источника.

Математической моделью теплового процесса является уравнение теплопроводности с соответствующими начальными и граничными условиями. Начальные условия задаются в виде распределения температуры в заданный момент времени, чаще при $t=0$, а в качестве граничных условий – либо температура на границах рассматриваемой области (граничные условия первого рода), либо тепловой поток (граничные условия второго рода).

В качестве системы координат чаще всего используют линейную (декартову), цилиндрическую или сферическую системы координат. Выбор системы координат определяется формой тела, его размерами и характером действия концентрированного источника энергии.

Для тел вращения используют цилиндрическую систему координат, для прочих тел – линейную.

Размерность математической модели определяется количеством пространственных переменных и временем, а также требуемой точностью, временем расчета, располагаемыми вычислительными ресурсами и математическим описанием геометрии нагреваемого тела.

В данном случае необходимо рассматривать тепловой процесс при стыковой сварке тонкостенных цилиндров быстро движущимся источником, с мощностью, равномерно распределенной по толщине свариваемых деталей. Начало системы координат находится на пересечении оси луча лазера с верхней точкой стыка двух тонкостенных цилиндров.

Луч лазера движется со скоростью сварки по направлению оси Ox .

Математическая модель процесса теплопереноса при сварке описывается квазистационарным уравнением теплопроводности, а теплообмен с окружающей средой и металлом – различными нелинейными граничными условиями.

Математические модели процессов сварки предполагают учитывать, при их описании, геометрию нагреваемых тел, а именно: бесконечное или полубесконечное тело, бесконечная или полубесконечная пластина, плоский слой, бесконечный или полубесконечный стержень.

Источники тепла, встречающиеся в практических случаях сварки, также разнообразны. Их классифицируют по следующим признакам [103–107]:

- по признаку распределения: сосредоточенные (точечный, плоский, объемный) и распределенные (по определенному закону ввода тепла в изделие);

- по времени действия: мгновенно и непрерывно действующие;

– по расположению относительно рассматриваемой точки во времени: неподвижные, подвижные, быстродвижущиеся источники тепла.

При разработке технологических процессов сварки режим воздействия сварочного источника (режим сварки) определяется эмпирически из справочных данных или методами моделирования. Определение режима сварки с использованием методов математического и численного моделирования позволяет повысить его точность, достоверность и сократить дорогостоящий натурный эксперимент при отладке режима на сварочных образцах.

Для оценки характера распределения температурных полей при лазерной сварке можно использовать математическую модель, в которой тепловое воздействие луча лазера рассматривается как воздействие быстродвижущегося линейного источника нагрева.

Геометрическая форма свариваемых изделий в реальных условиях является сложной. Учет действительной формы может значительно усложнить решение температурных задач сварочных процессов. Поэтому реальную форму свариваемых элементов в тепловых расчетах упрощают [105]. В данном случае пружинно-витой канал будет рассматриваться как тонкостенная цилиндрическая оболочка, образованная узкими пластинами [106].

За основу расчетов принята модель, предложенная в работе [104].

Согласно данной модели, нагрев при односторонней сварке кольцевых швов тонкостенных цилиндрических оболочек может быть приравнен к случаю нагрева пластины линейным источником теплоты. Это объясняется тем, что цилиндр представляет собой развертывающуюся поверхность.

При малых диаметрах распространение тепловых потоков в меридиональном направлении стеснено. Поэтому распространение тепла

от мгновенного линейного источника в цилиндре малого диаметра аналогично процессу распространения тепла от такого же источника в узкой пластине, имеющей ширину, равную периметру цилиндра [79; 108].

При наложении кольцевых или спиральных швов необходимо иметь в виду, что происходит наложение тепловых потоков от различных участков сварного шва. Так, на замыкающем участке кольцевого шва металл, на который накладывается валик, уже прогрет. Учесть это можно вводя фиктивный источник тепла, который начал действовать одновременно с действительным источником и движется с той же скоростью на расстоянии, равным периметру цилиндра по направлению сварки [105; 106].

Будем считать, что нагрев тонкостенного цилиндра происходит под воздействием лазерного излучения под углом $\alpha = 90^\circ$ к образующей цилиндра [109].

Наложение тепловых потоков при моделировании лазерной сварки по винтовой линии учитывается путем суммирования температурных полей от действительного и фиктивного источника лазерного излучения.

С учетом данного факта формула для расчета температурного цикла приобретает следующий вид:

$$T(y, t) = \frac{q}{v\sqrt{4\pi\lambda c_p t}} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt} + \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c_p (t-t_1)}} e^{-\frac{y^2}{4a(t-t_1)} - b(t-t_1)},$$

где $T(y, t)$ – температура в точке y во время t , К; q – эффективная мощность источника тепла, Вт; v – скорость перемещения источника тепла, м/с; δ – толщина пластины, м; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(мК); c_p – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К); t – время воздействия действительного источника теплоты, с; t_1 – время воздействия фиктивного источника теплоты, с; a – коэффициент температуропроводности, м²/с; b – коэффициент теплоотдачи, с⁻¹.

Исходя из принятой математической модели, на основе параметров, полученных при проведении опытных работ в системе MathCAD, были построены термические циклы на расстояниях от оси шва $y=0,2$; $y=0,8$; $y=1$; $y=2$ (рис. 76).

В теории сварочных процессов актуальной является задача определения мощности q сварочного источника, которую можно определить в зависимости от заданного распределения температуры.

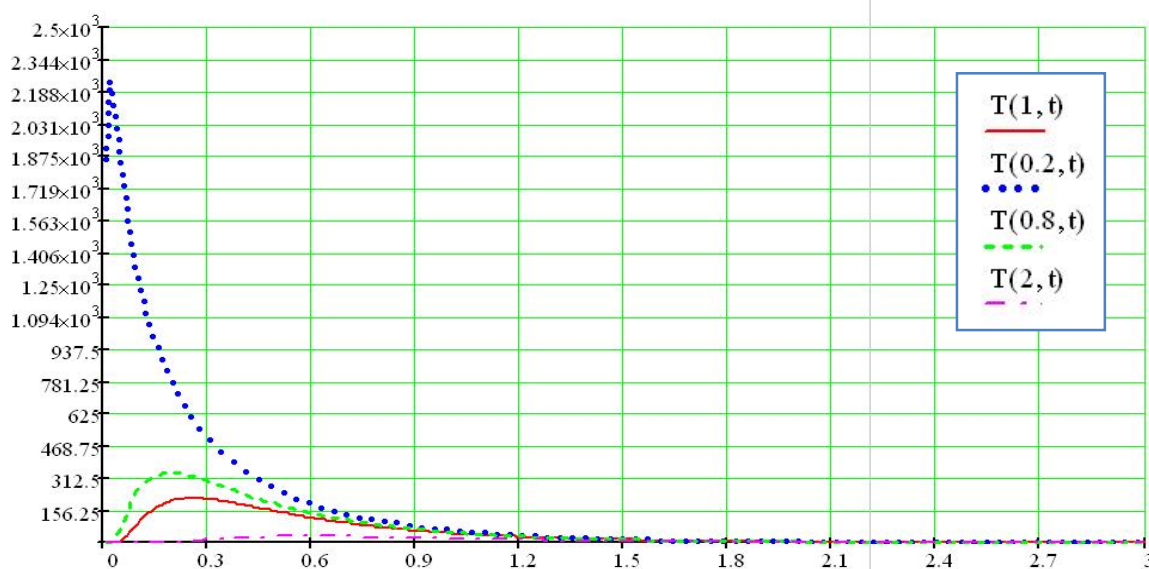


Рис. 76. Термические циклы на расстояниях от оси шва:
 $y=0,2$; $y=0,8$; $y=1$; $y=2$

Решение задачи определения режима, как обратной задачи, сводится к поиску функции источника q по заданному распределению температуры T . Заданное распределение температуры T' строится с учетом размеров сварного шва (ширины шва, глубины проплавления), формы его поперечного сечения, ширины зоны термического влияния, распределения максимальных температур нагрева и т.д.

Оптимизацию режима лазерной сварки пружинно-витого канала следует выполнять на основе моделирования теплового процесса сварки [109].

Функция заданной температуры с равномерным распределением ее максимального значения T_m на отрезке от y_1 до y_2 определяется следующим образом:

$$T'(y) = \begin{cases} T_m, y \in (y_1, y_2) \\ 0, y \in (-\infty, y_1) \cup (y_2, +\infty) \end{cases} \quad (6.1)$$

Очевидно, что ни при каких значениях параметров сварки, заданное значение температуры не будет совпадать с действительным.

Задачей оптимизации режимов лазерной сварки является определение мощности быстро движущегося источника, при которой действительное распределение температуры имеет минимальное отклонение от заданного.

Исходя из вышеизложенного, необходимо построить функционал на невязках уравнения (6.1). Квадратичный функционал в этом случае имеет вид:

$$J[q_0] = \int_{-\infty}^{+\infty} (T(y) - T(y, t))^2 dy.$$

После преобразований квадратичный функционал принимает вид:

$$J[q_0] = \int_{y_1}^{y_2} T_m^2 dy - 2T_m \int_{y_1}^{y_2} T(y, t) dy + \int_{+\infty}^{-\infty} T^2(y, t) dy.$$

Или же

$$J[q_0] = Aq_0^2 - Bq_0 + C,$$

где

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{4\pi\lambda c\gamma t'(V\delta)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt} dy + \frac{1}{4\pi\lambda c\gamma(t-t')(V\delta)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{(y+\pi d)^2}{4a(t-t_1)} - b(t-t_1)} dy, \\ B &= \frac{2T_m}{V\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma t'}} \int_{y_1}^{y_2} e^{-\frac{y^2}{4at} - bt} dy + \frac{2T_m}{V\delta\sqrt{4\pi\lambda c\gamma(t-t')}} \int_{y_1}^{y_2} e^{-\frac{(y+\pi d)^2}{4a(t-t_1)} - b(t-t_1)} dy, \\ C &= T_m^2(y_2 - y_1). \end{aligned}$$

Оптимальное значение мощности лазерного излучения определяется при минимальном значении $J[q_0]$.

Необходимым условием минимума функции является [104]:

$$2Aq - B = 0.$$

Исходя из этого, выражение оптимальной мощности источника при нагреве, имеет следующий вид:

$$q_{opt} = T_m V \delta \sqrt{4\pi\lambda c\lambda} e^{-bt_2} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} e^{-\alpha^2} dy,$$

где

$$\alpha = \frac{y}{\sqrt{4at'}}, \quad \alpha_1 = \frac{y_1}{\sqrt{4at'}}, \quad \alpha_2 = \frac{y_2}{\sqrt{4at'}},$$

t – время воздействия лазерного излучения, с.

Численное определение значения q_{opt} производится с использованием системы MathCAD.

Полученное значение мощности лазерного излучения при нагреве тонкостенного цилиндра является оптимальным с точки зрения минимального отклонения истинного распределения температуры от заданного в момент времени t' .

При выполнении лазерной сварки, как и при всех способах сварки, проводится входной контроль качества основных, вспомогательных материалов, исправности работы оборудования, правильности выставления режима сварки и контроль качества сварного соединения.

Контроль качества сварочных работ делится на два этапа: контроль процесса сварки; контроль качества сварного соединения.

При подготовке и в процессе лазерной сварки проверяют следующие параметры: исправность сварочного оборудования, приборов и аппаратов для контроля качества сварных соединений; качество сварочных материалов, их соответствие требованиям ТУ и ГОСТов на их поставку и

наличие сертификатов. При изготовлении пружинно-витого канала проверяется чистота защитного газа – аргона; правильность сборки – зазор между витками пружины $S=0,1$ мм; чистоту свариваемых кромок от окалины, ржавчины, краски, масла и т.п. Заготовка пружинно-витого канала поставляется на сварку после промывки и обезжиривания. Контроль сварных соединений включает в себя контроль наружных и внутренних дефектов сварных швов. Контроль наружных дефектов в сварных швах и околошовной зоне осуществляют путем внешнего осмотра (визуального или с применением лупы с шестикратным увеличением) и измерения их геометрических размеров. Визуальному осмотру с проведением необходимых измерений подлежат 100% сварных швов [110; 111].

По внешнему виду сварные швы не должны иметь скоплений или цепочек пор и шлаковых включений, кратеров, наплывов, прожогов, сужений, перерывов и подрезов.

О качестве выполнения сварного шва можно судить после проведения следующих мероприятий.

1. Метрологический контроль геометрических размеров пружинно-витых каналов.

2. Металлографический контроль сварных соединений пружинно-витых каналов.

3. Пневмогидравлические испытания пружинно-витых каналов.

Металлографический контроль проводится с целью установления соответствия фактических размеров сварного узла требуемым.

При этом контролируется длина пружинно-витого канала теплообменного аппарата – l , мм; глубина проплавления – h , мм; изменение толщины стенки трубы от фактического диаметра проволоки – t , мм.

Металлографический контроль сварных соединений пружинно-витых каналов выполняется с целью исследования сварного шва на наличие дефектов в виде пор, трещин, несплавлений, структуры шва и зоны термического влияния. Характер структуры металла шва позволяет оценить его механические свойства.

Пневмогидравлические испытания проводятся с целью проверки плотности шва.

Гидравлические испытания, помимо проверки плотности швов, дают возможность определить прочность пружинно-витого канала при наибольших нагрузках [110].

Подбор режимов лазерной сварки был произведен на основе математической модели лазерной сварки, предложенной выше.

Для оценки адекватности данной математической модели и правильности подбора режимов сварки были проведены металлографические исследования сварных швов, выполненных на образцах-свидетелях [113; 114].

Были подготовлены два образца пружинно-витого канала: один образец был сварен посредством лазерной сварки непрерывным лазерным излучением, второй – посредством многопроходной лазерной сварки импульсным лазерным излучением.

Мощность излучения (энергия импульса) и скорость сварки подбирались на основании математической модели, исходя из требуемой глубины проплавления металла и производительности лазерной сварки.

Для проведения металлографического анализа были подготовлены микрошлифы.

Способ приготовления микрошлифов заключался в механическом шлифовании и последующем полировании образцов алмазными пастами. Для выявления микроструктуры использовался водный раствор сульфата

меди и соляной кислоты следующего состава: сульфат меди – 4 г, соляная кислота – 20 мл, вода – 20 мл. Время травления проката из нержавеющей стали аустенитного класса в значительной степени зависело от химического состава проката и составляло от 1 до 2 минут.

Структура сварных швов (на поперечных микрошлифах) была исследована с помощью оптического микроскопа Neophot 4.

Захват изображения осуществлялся с помощью оптической системы Opticam 5.

Измерения геометрических параметров проводились с помощью специализированного программного комплекса Optika Vision Pro V.2.7.

Твердость сварного шва, зоны термического влияния, основного металла определялась на твердомере типа «Виккерс» при нагрузке 1 кг.

На рис. 77–78 представлены области сварных швов пружинно-витых каналов.

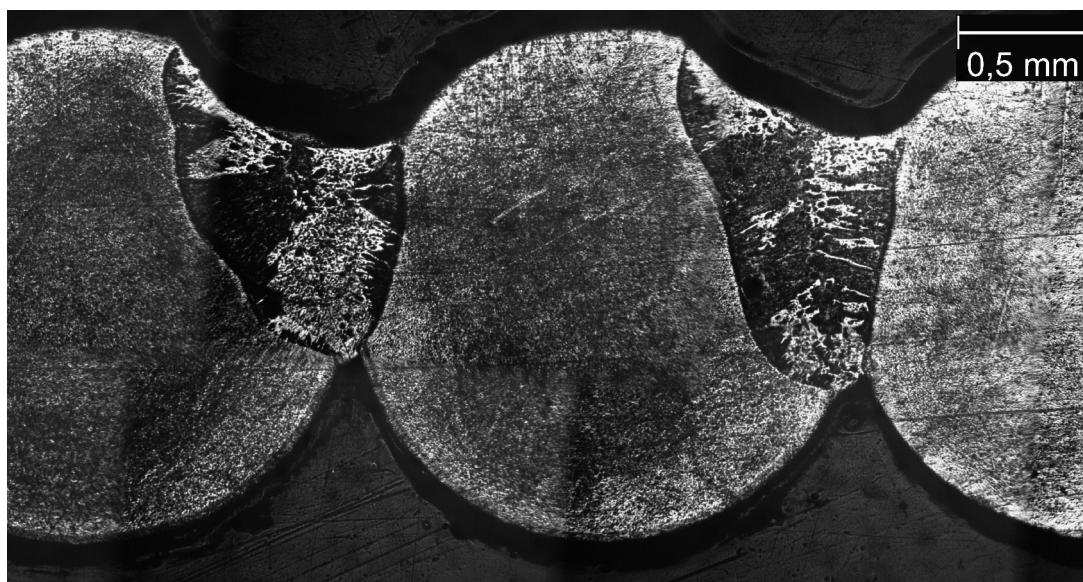


Рис. 77. Общий вид области сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой непрерывным лазерным излучением

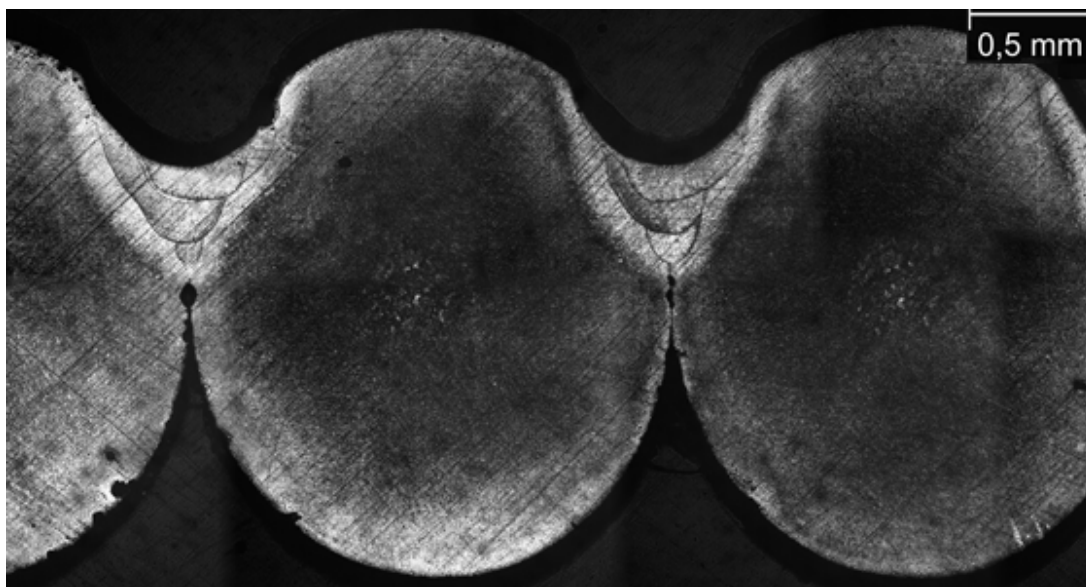


Рис. 78. Общий вид области сварного шва пружинно-витого канала, полученного многопроходной сваркой импульсным лазерным излучением

Очевидно, что сварной шов, полученный лазерной сваркой непрерывным лазерным излучением, по сравнению со швом, полученным многопроходной сваркой импульсным лазерным излучением, имеет большую глубину проплавления и значительно меньшую зону термического влияния.

Ширина сварного шва, полученного непрерывным лазерным излучением, составила 0,7 мм, глубина проплавления – 1,0 мм, при импульсной лазерной сварке ширина сварного шва составила 0,35 мм, а глубина проплавления – 0,5 мм.

В сварном шве, полученном сваркой непрерывным лазерным излучением, наблюдаются дефекты в виде пор, во втором же образце не происходит формирования корня шва. Эти дефекты связаны с высокой скоростью сварки, малыми размерами сварного шва и, соответственно, высокими скоростями кристаллизации расплавленного металла.

Из-за высокой скорости кристаллизации пузырьки воздуха не успевают покинуть жидкую сварочную ванну, образуя поры.

Для устранения подобных дефектов необходимо увеличивать время пребывания металла в жидкой фазе.

Сварные швы, полученные различными способами сварки, имеют также разную структуру. При лазерной сварке пружинно-витого канала непрерывным лазерным излучением формируется мелкозернистая структура шва (рис. 79).

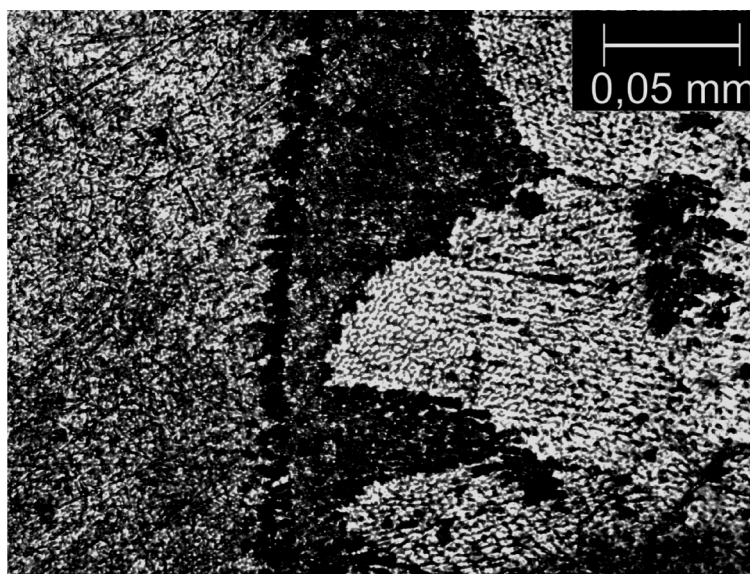


Рис. 79. Микроструктура металла переходной зоны сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой непрерывным лазерным излучением ($\times 100$)

Макроструктура сварного соединения состоит из вытянутых кристаллитов, растущих в направлении отвода теплового потока, от краев сварочной ванны вглубь шва. Кристаллиты образованы более мелкими дендритами аустенита длиной от 30 до 50 мкм. Зона термического влияния ярко выражена, размер ее составляет порядка 20 мкм.

В результате нагрева до высокой температуры под действием сварочного термического цикла вероятно выделение карбидов в зоне термического влияния, о чем свидетельствует более высокое значение твердости в этой зоне по сравнению с основным металлом.

Дендриты в сварочной ванне разориентированы, по своей форме близки к равноосному зерну и имеют размер в среднем 20–30 мкм, что в конечном итоге может положительно повлиять на стойкость к образованию холодных трещин.

Микроструктура сварного соединения, полученного многопроходной импульсной лазерной сваркой, отличается более высокой дисперсностью (рис. 80).

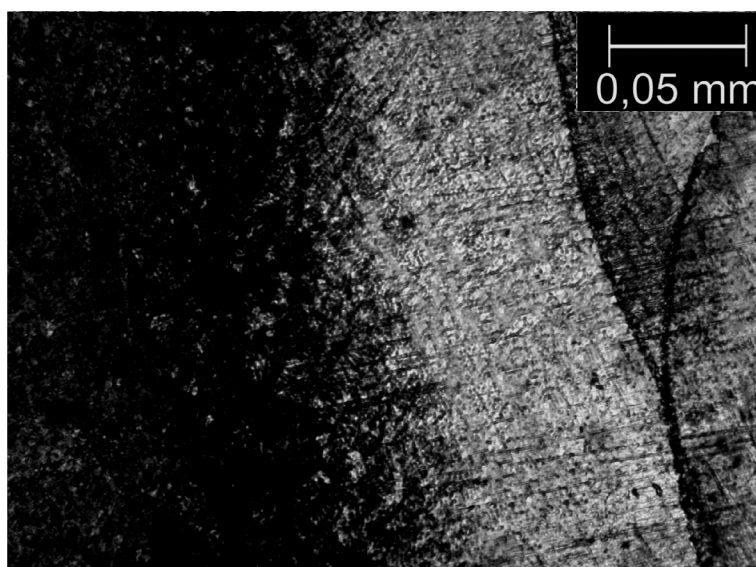


Рис. 80. Микроструктура металла переходной зоны сварного шва пружинно-витого канала, полученного сваркой импульсным лазерным излучением ($\times 100$)

На процесс формирования микроструктуры сварного шва и околошовной зоны существенно оказывают влияние параметры термического цикла сварки. Вследствие малого объема расплава сварочной ванны и ограниченного времени воздействия лазерного излучения наблюдаются отличия лазерной сварки, состоящие в высокой дисперсности структурных составляющих и меньших размерах всех зон по сравнению с традиционными видами сварки.

Это объясняется тем, что развитие тепловых процессов в свариваемом изделии, приводящих к нагреву свариваемых кромок, начинается непосредственно в зоне фокального пятна лазерного излучения

на поверхности обрабатываемых материалов и переноса тепловой энергии от поверхности вглубь материала за счет их теплопроводности.

Из методов оценки механических свойств сварных швов, регламентирован и применим в данном случае метод измерения твердости.

Согласно п. 4.10.4 ПБ 03-585-03 «Правила проектирования, изготовления и приемки сосудов и аппаратов стальных сварных», твердость металла шва сварных соединений из стали аустенитного класса должна быть не более 200 НВ.

В результате проведенных исследований, твердость основного металла составляет 188–196 НВ, твердость сварного шва, полученного непрерывным лазерным излучением составляет 163–196 НВ, твердость переходной зоны – 194–232 НВ, а импульсным – 174–192 НВ, 162–175 НВ, соответственно. Таким образом, при импульсной лазерной сварке наблюдается разупрочнение зоны термического влияния.

С уменьшением размера зерна увеличивается количество стыков зерен как возможных источников зарождения межкристаллитной коррозии, но сводится к минимуму вероятность ее глубокого проникновения в металл. С учетом рабочих режимов, имеющих место при работе кожухотрубчатого теплообменного аппарата, можно сказать, что коррозионная стойкость сварного соединения выше уровня коррозионной стойкости основного металла.

В качестве особенности лазерной сварки стоит отметить высокие требования к качеству стыковки свариваемых поверхностей: из-за большого зазора между свариваемыми витками наблюдается недостаточная глубина проплавления.

Кроме того, для оценки качества сварного соединения были проведены испытания на механическую прочность сварного шва.

Исследования и испытания сварных швов на механическую прочность проводятся согласно требованиям ГОСТ 6996-66 «Методы определения механических свойств».

Согласно данному стандарту были проведены испытания сварного соединения на статическое (кратковременное) растяжение.

Испытание на статическое растяжение проводится для определения следующих характеристик механических свойств материалов:

- предела текучести (физического) σ_T , МПа;
- предела текучести (условного) $\sigma_{0,2}$, МПа;
- временного сопротивления σ_B , МПа;
- относительного удлинения после разрыва δ , %;
- относительного сужения после разрыва ψ , %.

При испытании сварного соединения на статическое растяжение определяют только временное сопротивление наиболее слабого участка.

Для испытания сварного шва на статическое растяжение был подготовлен плоский образец толщиной 2 мм со скосом кромок, сваренный импульсной лазерной сваркой, имитирующий сварное соединение пружинно-витого канала.

Внешний вид образца после испытания на статическое растяжение представлен на рис. 81.

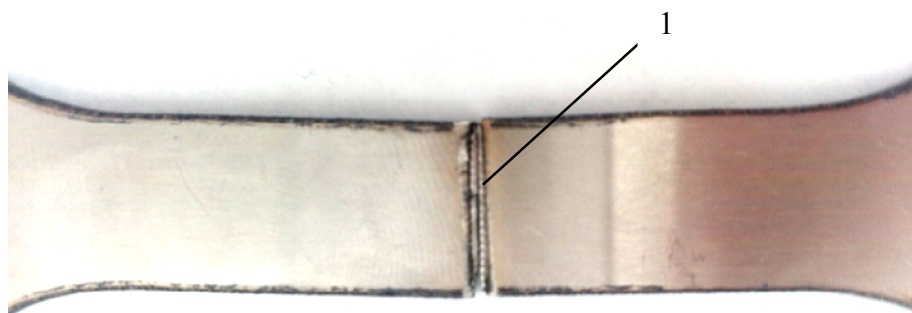


Рис. 81. Образец сварного соединения стали 12X18H10T после испытания на разрыв: 1 – место разрыва образца при растяжении

Результаты проведенных испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2

Образец	σ_B , МПа	σ_T , МПа	δ , %	ψ , %
Сварной шов	460	—	—	—
Основной металл	505	270	60,0	66,0

В таблице приведены средние значения величин по трем испытаниям. Разброс значений составил не более 5%.

Как видно из результатов, предел выносливости сварного шва находится на уровне основного металла. Предел текучести, относительное удлинение и сужение образцов определить не удалось, так как имеет место хрупкое разрушение, которое объясняется тем, что площадь поперечного сечения сварного шва в результате скоса кромок на 50% меньше поперечного сечения основного металла.

Проведенный металлографический анализ сварных швов, выполненный непрерывным и импульсным лазерным излучением, позволил сделать следующие выводы:

- более высокое качество сварного шва обеспечивается импульсным лазерным излучением;
- при сварке непрерывным лазерным излучением происходит упрочнение зоны термического влияния, повышается склонность к образованию холодных трещин;
- зона термического влияния при однократной лазерной сварке непрерывным лазерным излучением значительно меньше, чем при многократной импульсной лазерной сварке.

Таким образом, высокое качество шва, снижение влияния сварочных напряжений за счет уменьшения тепловложений позволяют прогнозировать положительные результаты в деле модернизации технологии изготовления пружинно-витого канала кожухотрубчатого

теплообменного аппарата из стали 12X18H10T с использованием импульсной лазерной сварки при повышении энергии импульса.

Импульсная лазерная шовная сварка осуществляется с помощью импульсного излучения с высокой частотой следования импульсов. При этом как скорость, так и глубина сварки будут зависеть от теплофизических свойств свариваемых материалов. При средней мощности лазерного излучения 100–200 Вт, частоте следования импульсов до 20–50 Гц и глубине проплавления до 0,3 мм можно выполнять шовную сварку со скоростью до 1,0–1,5 м/мин.

Повысить производительность импульсной лазерной сварки можно за счет увеличения энергии импульса, но необходимо учитывать, что с увеличением энергии излучения в импульсе в современных лазерных установках частота следования импульсов снижается. Для увеличения производительности (скорости) сварки возможно фокусирование излучения не в круглое пятно, а в прямоугольное или овальное [113; 114].

Для контроля внутренних дефектов сварных швов пружинно-витых каналов (пор, трещин, непроваров) также проводятся пневмогидравлические испытания. Общие методы испытаний на герметичность определены ГОСТ 24054-80 и ГОСТ 25136-82.

Метод испытаний пружинно-витых каналов осуществляется компрессорным способом без применения индикаторных масс, наносимых на контролируемые сварные соединения.

Для проверки качества сварных швов пружинно-витой канал с приваренными патрубками погружают в ванну с водой, заполняют его очищенным и осушенным воздухом под давлением. О негерметичности сварных швов судят по появлению пузырьков газа, исходящих из пружинно-витого канала. Наибольшее давление воздуха, подаваемое в пружинно-витой канал, $P_{\max}=10$ атм.

Пневмогидравлические испытания пружинно-витого канала производят при нормальном атмосферном давлении, температуре окружающей среды $+17\div 35^{\circ}\text{C}$.

Функциональная схема стенда для пневмогидравлических испытаний показана на рис. 82.

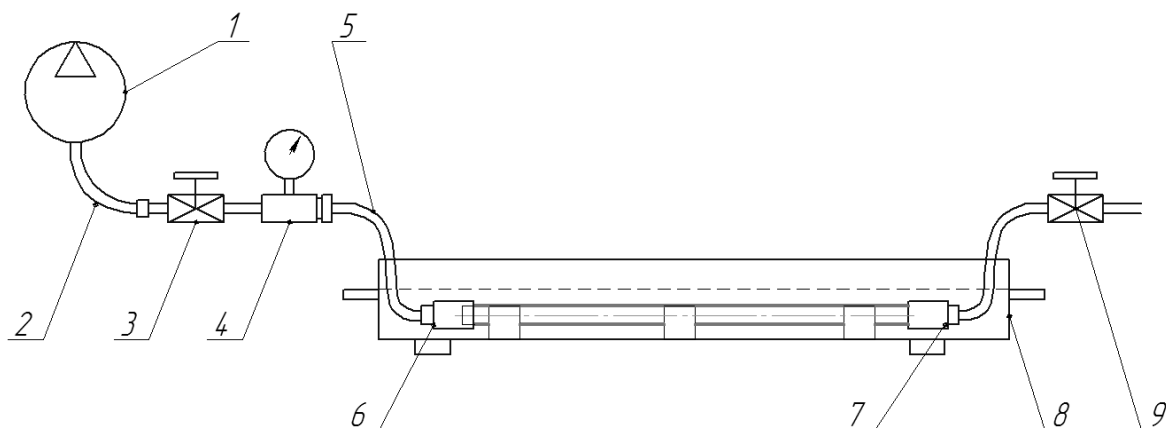


Рис. 82. Функциональная схема пневмогидравлических испытаний пружинно-витого канала: 1 – компрессор высокого давления; 2, 5 – шланг высокого давления; 3, 9 – вентиль; 4 – манометр; 6, 7 – муфта типа «GEBO»; 8 – ванна, заполненная водой

Пробный газ (вещество), используемое для испытаний на герметичность, не должно вредно воздействовать на пружинно-витой канал и людей.

Подготовка пружинно-витого канала к испытаниям на герметичность должно предусматривать устранение последствий случайного появления течей в сварном соединении после хранения и транспортировки.

Для испытания на герметичность следует использовать аппаратуру, оборудованную специальными присоединительными и установочными деталями, в соответствии с техническими условиями на пружинно-витой канал.

Отсутствие пузырьков воздуха говорит о том, что сварное соединение пружинно-витого канала имеет высокое качество.

Прочность сварных швов определяют механическими испытаниями на растяжение и изгиб (ГОСТ 6996–66).

На базе пружинно-витого канала возможна организация производства прямых теплообменных элементов, змеевиковых теплообменных элементов с широким диапазоном конструктивных особенностей [115].



Рис. 83. Гидравлические испытания пружинно-витого канала

Полученные результаты механических характеристик и микро-структуры сварного шва и зоны термического влияния показывают преимущества лазерной сварки при производстве оборудования данного типа. Высокая степень автоматизации процесса лазерной сварки и высокая производительность работ делают данную технологию перспективной.

Глава седьмая

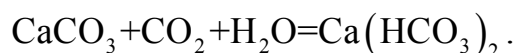
ПРОЦЕССЫ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ В ТРУБАХ С ДИСКРЕТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ

Вопросам солеотложения на поверхностях теплообмена посвящено значительное число работ [4; 164–175]. Эти процессы исследовались в гладких круглых трубах [118; 173; 174], каналах с искусственной шероховатостью [172], при закрутке потока внутри витой трубы овального профиля [118], в трубах с кольцевыми диафрагмами [169; 173] и кольцевой накаткой [170].

В этих работах было теоретически обосновано и экспериментально подтверждено ряд положений, касающихся процессов солеотложения [168–171; 173; 174]. Однако и в настоящее время остаются актуальными проблемы, касающиеся надежной работы оборудования, качества воды, которое обуславливается наличием в ней солей кальция и магния (карбонатной жесткостью) [172]. Так, согласно требованиям для тепловых сетей России, жесткость подпиточной воды должна быть 0,7 мг-экв/л (за границей 0,1 мг-экв/л).

Следует указать, что при таких требованиях к качеству воды необходима разработка мероприятий, касающихся внедрения в тепловые схемы энергоустановок ресурсо- и энергосберегающего инновационного теплообменного и водоподготовительного оборудования [4; 163; 173; 175]. Без водоподготовительного оборудования слой накипи толщиной в 1 см может вырасти менее чем за год.

Согласно современным представлениям солеотложение [169] и образование накипи на стенках теплообменных поверхностей происходит по причине содержания в природных водах бикарбоната кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, который образуется при взаимодействии растворенного в воде углекислого газа CO_2 с нормальным карбонатом CaCO_3 :



При нагревании в теплообменном аппарате такой воды, температура которой растет в направлении потока, происходит разрушение бикарбоната, а карбонат CaCO_3 оседает на стенках труб в виде накипи [169].

Одновременно с солеотложением происходит и вынос из пристенного слоя – осадков, образовавшихся на границе раздела фаз и не осевших на стенке [174]. Скорость солеотложения θ_{dep} (кг/с) пропорциональна концентрации солей в потоке жидкости [169]

$$\theta_{dep} = \rho_{foul} \lambda_{foul} K_1 \left(\frac{C}{1/K_p + 1/K_R} \right) - K_D C_w, \quad (7.1)$$

где K_1 , K_p , K_R , K_D – коэффициенты, зависящие от скорости течения, температуры и геометрических параметров канала.

Скорость выноса солеотложений с поверхности раздела фаз определяется поверхностной силой, с которой поток воздействует на слой отложений, и которая возрастает с увеличением толщины слоя отложений R_{foul} . Скорость рассчитывается по уравнению [169]

$$Q_{car} = K_2 \tau_w R_{foul} = K_3 \xi w^2 R_{foul}, \quad (7.2)$$

где $\xi = 8\tau_w / \rho w^2$ – коэффициент гидравлического сопротивления; K_2 и K_3 – коэффициенты.

С учетом уравнения (7.1) и (7.2), термическое сопротивление слоя отложений рассчитывается по уравнению [169]:

$$R_{foul} = \frac{K_1 C}{(1/K_p + 1/K_R)} \frac{1}{\xi w^2} \left[1 - \exp(-K_3 \xi w^2 \tau) \right]. \quad (7.3)$$

Уравнение (7.3) отражает влияние скорости течения, концентрации солей в охлаждающей воде, параметров закрутки и турбулизации потока

на термическое сопротивление отложений, а коэффициент K_3 зависит от скорости и геометрических параметров турбулизаторов на поверхности трубы и закрутки потока.

В работе [118] исследовался процесс солеотложения в теплообменнике типа «труба в трубе», где в качестве греющего теплоносителя использовалось хлопковое масло, а нагреваемой средой – соленая вода. В ходе эксперимента оценивалось солеотложение на внутренних поверхностях витых овальных труб, гладких круглых трубах и трубах с кольцевыми диафрагмами. По методике хлопковое масло предварительно нагревалось до температуры, равной 110–115°C. Холодная вода с заданным солесодержанием обладала карбонатной жесткостью до 20 мг-экв/л. В течение эксперимента карбонатная жидкость воды поддерживалась путем добавления в нее некоторого количества воды с более высокой жесткостью. При заданных параметрах жидкости на входе в теплообменник опыты продолжались до момента времени, когда прекращалось временное изменение термического сопротивления солеотложений.

Исследуемые витые трубы овального профиля имели: внешний диаметр $D_{out} = 10,4$ мм, внутренний диаметр $D = 10$ мм, относительный шаг закрутки $s/d = 6,2$ и $s/d = 12,2$. Трубы были изготовлены из нержавеющей стали. Гладкие круглые трубы и трубы с кольцевыми диафрагмами имели следующие параметры турбулизации потока d/D и t/D – 0,91 и 0,5; 0,91 и 0,25; 0,885 и 0,5. Внутренний диаметр внешней трубы теплообменника типа «труба в трубе» составлял 26 мм, а ширина кольцевого канала – 5 мм. При этом эквивалентный диаметр кольцевого канала равен $d_{eq} = 10$ мм. Длина теплообменника – 2,5 м.

Исследования проводились в следующем диапазоне параметров: температура холодной воды на входе в теплообменник $t_c = 20\text{--}30^\circ\text{C}$, скорость воды $w = 0,05\text{--}1,82$ м/с, число Рейнольдса $Re_c = (3\text{--}25) \cdot 10^3$, температура стенки $t_w = 70\text{--}100^\circ\text{C}$, карбонатная жесткость воды $C = 5, 10$ и 20 мг-экв/л, время непрерывного проведения исследования до 360 ч.

В результате экспериментов автором [170] было установлено, что для гладких круглых труб коэффициент теплопередачи уменьшается в течение 280 ч приблизительно в $2,5$ раза при концентрации соли (карбонатной жесткой воды) $C = 10$ мг-экв/л и в $3\text{--}4$ раза при $C = 20$ мг-экв/л. В этом случае термическое сопротивление слоя солеотложений не достигает асимптотического значения. Для витых труб и труб с кольцевыми диафрагмами при $C=10$ мг-экв/л и $Re = 4 \cdot 10^3$ за $200\text{--}240$ часов работы коэффициент теплопередачи уменьшается только на $2,5\%$, а термическое сопротивление выходит на свое асимптотическое значение. При концентрации $C=20$ мг-экв/л коэффициент теплопередачи для труб с интенсификацией уменьшается на $40\text{--}50\%$, что значительно меньше, чем для гладких круглых труб.

Рост солеотложений во времени приводит к росту гидравлического сопротивления. Так за 240 часов относительный прирост гидравлического сопротивления из-за солеотложений составляет примерно 100% для гладких круглых труб и $30\text{--}50\%$ для витых труб и труб с кольцевыми диафрагмами, а абсолютный прирост перепада давлений в трубах с кольцевыми диафрагмами в 2 раза превышает абсолютный прирост перепада в витых и гладких трубах [118]. По мнению автора [118], это объясняется тем, что в трубах с кольцевыми диафрагмами из-за отрывных течений на диафрагмах толщина солеотложений различна по длине канала, что увеличивает долю перепада давлений на местных сопротивлениях в суммарном перепаде давлений на трубе.

В витых трубах толщина солеотложений распределяется на поверхности равномерно и не создает местных сопротивлений труб. Эффективность труб с интенсификаторами и закруткой потока при солеотложении увеличивается по сравнению с эффективностью гладких круглых труб. Если в начальный момент процесса солеотложения ($\tau = 0$) отношение коэффициента теплопередачи труб с кольцевыми диафрагмами и витых труб к коэффициенту теплопередачи гладких труб составляет $K_l/K_{lsm} = 2,5-3$, то при $\tau/\tau_\infty = 1$ отношение $K_l/K_{lsm} = 3-3,5$.

В ходе исследований автором [118] было показано, что закрутка потока внутри витых овальных труб и турбулизация потока кольцевыми диафрагмами позволяет значительно интенсифицировать тепломассообмен в этих каналах и уменьшить за счет этого солеотложения на внутренних поверхностях. Обнаружено также, что с течением времени термическое сопротивление слоя солеотложений внутри этих труб асимптотически приближается к своему постоянному значению, что не наблюдается на внутренних поверхностях гладких круглых труб. Кроме того, интенсификация тепломассообмена в трубах позволяет уменьшить минеральные отложения на внутренней поверхности примерно в 5 раз по сравнению с гладкими круглыми трубами, а замена гладких круглых труб витыми трубами или трубами с кольцевой накаткой позволяет обеспечить надежную работу трубчатых теплообменных аппаратов без специальной очистки их поверхности от солеотложений.

Результаты исследования процесса солеотложений в витых трубах и трубах с кольцевыми диафрагмами были обобщены степенными зависимостями для труб с кольцевыми диафрагмами [118; 170]:

$$R_{foul} = 11,81 \text{Re}^{-0,29} C^{0,214} \left(\frac{\tau}{\tau_\infty} \right)^{0,129} \left(\frac{d}{D} \right)^{0,701} \left(0,062 + 1,2 * 10^{-3} \frac{t}{D} \right). \quad (7.4)$$

Для витых труб:

$$R_{foul} = 0,204 \text{Re}^{-0,227} C^{0,36} \left(\frac{\tau}{\tau_{\infty}} \right)^{0,236} \left(\frac{s}{D} \right)^{0,447}, \quad (7.5)$$

где C – карбонатная жесткость воды (мг-экв/л); d – максимальный размер овального профиля витой трубы (м); D – внутренний диаметр трубы (м); s – шаг закрутки витых труб (м); t – шаг турбулизаторов (м).

Зависимость (7.4) справедлива для $\tau_{\infty} = 250$ ч и диапазона изменения параметров

$$\frac{d}{D} = 0,91 - 0,94,$$

$$\frac{t}{D} = 0,25 - 0,5,$$

$$\text{Re} = (4-25) \cdot 10^3,$$

$$C = 5 - 20 \text{ мг-экв/л},$$

а зависимость (7.5) в диапазоне изменения параметров при $S/d = 6,2-12,2$, $\text{Re} = (3,2-25) \cdot 10^3$, $C = 5-20$ мг-экв/л, при $\tau = 250$ ч.

Расчет коэффициента теплопередачи проводится с использованием линейного термического сопротивления солеотложений [118]:

$$\frac{1}{k_l} = \frac{1}{\alpha_1 D} + \frac{1}{2\lambda_w} \ln \ln \frac{D_{out}}{D} + \text{Re}_{found} + \frac{1}{\alpha_2 D_{out}},$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты теплопередачи внутри и снаружи трубы; Re_{found} – линейное термическое сопротивление слоя солеотложений на внутреннем диаметре трубы ($\text{м}^2\text{К/Вт}$).

В работе [170] исследовался процесс солеотложений на внутренней стенке теплообменной трубки с кольцевыми турбулизаторами.

Для этих целей был сконструирован кожухотрубчатый одноходовой теплообменный аппарат, в котором осуществлялось противоточное течение в трубном пространстве нагреваемого теплоносителя – воды, а в

межтрубном – греющего теплоносителя – пара. Трубы с кольцевыми турбулизаторами имели: шаг канавки h – 2,4 и 8 мм, глубина канавки m изменялась от 0,5 до 2 мм. Трубы изготавливались из Ст20, нержавеющей стали 1х18Н10Т и латуни.

Вода в трубах нагревалась до температуры 80–115 °С и имела повышенную карбонатную жесткость до 20 мг-экв/л. При заданных параметрах теплоносителя на входе в теплообменник эксперимент длился до 2000 ч, что позволило авторам [170] определить изменение по времени коэффициента теплопередачи и термического сопротивления от скорости воды, ее температуры, параметров турбулизаторов. Так как скорость воды существенно влияет на скорость образования отложений, в эксперименте рассматривался ламинарный и турбулентный режим течения.

Авторами [170] предложена математическая модель процесса солеотложения при следующих предпосылках.

Пусть в отрезках трубы длиной dz (м) и радиусом R (м) входит раствор с концентрацией вещества – C (кг/м³). Из него на стенку выпадает некоторая масса. В результате за период времени $d\tau$ (с) радиус трубы уменьшается на δ и становится равным r . Предполагается, что масса накипеобразователя вносится в выделенный отрезок трубы со скоростью v (м/с) конвективным путем и диффузией с коэффициентом диффузии D^* (м²/с). Часть массы распределяется на поверхности с поверхностной плотностью a (кг/м²).

Тогда закон сохранения массы для внутреннего участка трубы авторы [171] записывают следующим образом:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\pi r^2 C dz) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\pi D^* \frac{\partial C}{\partial z} r^2 dz \right) - \frac{\partial}{\partial z} (\pi v r^2 C dz) - \frac{\partial}{\partial \tau} (2\pi r a dz). \quad (7.6)$$

Поделив уравнение (7.6) на массу накипеобразователя в растворе $m_0 = \pi R^2 C_0 dz$ в начальный момент времени, уравнение (7.6) принимает вид:

$$\frac{\partial \beta}{\partial \tau} + v \frac{\partial \beta}{\partial z} = D^* \frac{\partial^2 \beta}{\partial z^2} - \frac{\partial n}{\partial \tau},$$

где

$$\beta = \frac{R^2 C}{R^2 C_0}; \quad n = \frac{2ra}{R^2 C_0}.$$

В ходе исследований были установлены следующие закономерности [170]. Для гладких труб из стали удельное количество отложений различается в 1,4–4 раза. Отложения образуются вместе с начальным процессом коррозии. В гладких трубах из латуни и нержавеющей стали отложения незначительные, преимущественно образовывались по длине трубы в виде «тонковидных полос» и носят локальный характер, при этом у латунных труб отложения незначительно меньше по сравнению с нержавеющей. У труб с турбулизаторами отложения располагаются преимущественно во впадинах, на выступах происходит снижение интенсивности образования отложений и формирование на них более плотных структур. Сравнение солеотложения в гладких и накатанных трубах показывает, что новых отложений в накатанных трубах в 1,5–2 раза ниже, чем в гладких трубах. Использование накатанных труб в теплообменниках при ламинарном режиме течения неэффективно, они по сравнению с гладкими трубами подвержены большему образованию отложений. Использование труб с турбулизаторами в турбулентном режиме способствует меньшему образованию отложений по сравнению с гладкими трубами. Образование отложений у труб с турбулизаторами пропорционально отношению m/d , где m – глубина канавки; d – внутренний диаметр канавки. Максимальное значение отложений в трубах

с турбулизаторами достигается при отношениях $m/d = (4-14) \cdot 10^3$ и $h/m = 1-1,8$ (h – шаг канавки, мм), при дальнейшем увеличении отношения солеотложение уменьшается.

Таким образом, авторы показали, что отложение внутри труб за счет влияния кольцевых диафрагм значительно меньше, чем на гладких трубах и подчиняется асимптотическому закону. Это позволяет при замене гладких труб на трубы с кольцевыми турбулизаторами обеспечить надежную работу кохожутрубчатых теплообменных аппаратов без специальных мероприятий по очистке их поверхностей [170].

Известны исследования [171], касающиеся особенностей образования отложений на шероховатых поверхностях. Для этих целей была создана экспериментальная установка, представляющая собой вертикально расположенный кольцевой канал, состоящий из погружной трубы с внутренним диаметром 14 мм и внутренней обогреваемой трубы с наружным диаметром 10 мм. Общая длина кольцевого канала составляла 0,4 м. Обогрев внутренней трубы осуществлялся путем непосредственного пропускания через нее переменного тока низкого напряжения. Температура стенки опытной трубы измерялась в трех местах с помощью термопар. Температура теплоносителя измерялась на входе и выходе кольцевого канала. В качестве теплоносителя использовалась сетевая вода с жесткостью 3,6 мг-экв/л. При постоянных значениях теплового потока, температуры, расхода и давления воды на входе кольцевого канала, измерения проводились каждые 15 мин. При каждом заданном режиме эксперимент проводился 24–28 часов. Шероховатость в исследуемой трубе создавалась путем намотки на опытную трубу проволоки.

Высота элементов шероховатостей равна 0,1; 0,2; 0,3 мм; отношение шага между элементами шероховатостей (S) к их высоте (h) равнялась 5; 12,5 и 25 мм.

В результате экспериментов установлено, что создание на поверхности нагрева двухмерной шероховатости обуславливает существование снижения интенсивности образования отложений. При этом имеет место снижение коэффициентов теплоотдачи как в случае гладкой, так шероховатой поверхности.

Однако снижение интенсивности теплоотдачи в случае гладкой поверхности имеет более резкий характер, чем в случае шероховатой поверхности. Отношение коэффициента теплоотдачи шероховатой поверхности (α_{sh}) к коэффициенту теплоотдачи гладкой поверхности (α_{gl}) увеличивается с 2,5 до 3,4 по истечении 8 часов работы установки.

В работе [171] были проведены также эксперименты для оценки особенности отложения в трубах с лунками. Как показали исследования, коэффициент теплоотдачи поверхности с лунками, в отличие от поверхности с двухмерной шероховатостью, резко снижается с течением времени в результате образования отложений. Авторы [171] объясняют этот факт тем, что лунки способствуют удержанию отложений на поверхность нагрева.

Одновременно были исследованы поверхности с двухмерной шероховатостью $h = 0,1$ мм, $\delta/p = 12,5$, а также $h = 0,2$ и $0,3$ мм. В работе [171] было сделано заключение, что увеличение высоты элементов шероховатости не оказывает никакого влияния на процесс образования отложений, а наиболее эффективной является двухмерная шероховатость с параметрами $s/h = 12,5$.

Глава восьмая

ПРИМЕР РАСЧЕТА ВОДО-ВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

8.1. Расчет водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе» с прямыми трубами

Произведем расчет змеевикового теплообменника типа «труба в трубе». За базовый вариант примем расчет водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе» с прямыми трубами [182].

Задача. Определить площадь поверхности нагрева и число секций водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе» (рис. 84). Гретьящая вода движется по внутренней стальной трубе [$\lambda_c = 45 \text{ Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$] диаметром $d_2/d_1 = 35/32 \text{ мм}$ и имеет температуру на входе $t'_{g1} = 95 \text{ }^\circ\text{C}$. Расход гретьящей воды $G_1 = 2130 \text{ кг/ч}$.

Нагреваемая вода движется противотоком по кольцевому каналу между трубами и нагревается от $t'_{g2} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t''_{g2} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$. Внутренний диаметр внешней трубы $D = 48 \text{ мм}$. Расход нагреваемой воды $G_2 = 3200 \text{ кг/ч}$. Длина одной секции теплообменника $l = 1,9 \text{ м}$.

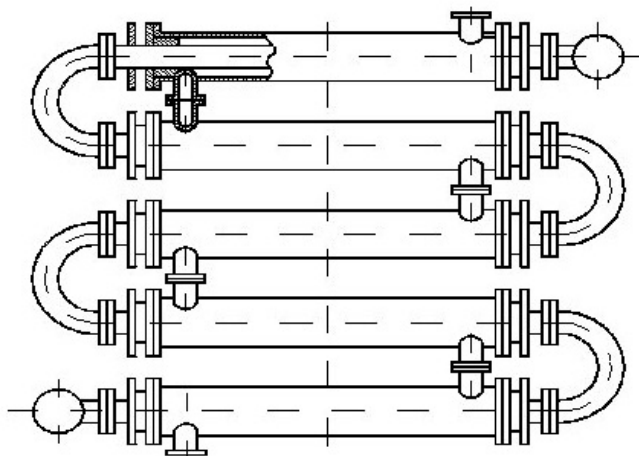


Рис. 84. Теплообменник
типа «труба в трубе»

Потерями теплоты через внешнюю поверхность теплообменника пренебречь.

Решение

Теплоемкость воды $c_p \approx 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$.

Количество передаваемой теплоты

$$Q = G_2 c_{p2} (t''_{g2} - t'_{g2}) = \frac{3200}{3600} 4,19 (45 - 15) = 111 \text{ кВт.}$$

Температура греющей воды на выходе

$$t''_{g1} = t'_{g1} - \frac{Q}{G_1 c_{p1}} = 95 - \frac{111 \cdot 3600}{2130 \cdot 4,19} = 50 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Находим среднеарифметические значения температур теплоносителей и значения физических свойств воды при этих температурах:

$$t_{g1} = 0,5(t'_{g1} + t''_{g1}) = 0,5(95 + 50) = 72,5 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\rho_{g1} = 976 \text{ кг/м}^3; \text{Pr}_{g1} = 2,47;$$

$$\nu_{g1} = 0,403 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g1} = 0,670 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)};$$

$$t_{g2} = 0,5(t'_{g2} + t''_{g2}) = 0,5(15 + 45) = 30 \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$\rho_{g2} = 996 \text{ кг/м}^3; \text{Pr}_{g2} = 5,42;$$

$$\nu_{g2} = 0,805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g2} = 0,618 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}.$$

Скорости движения теплоносителей

$$w_1 = \frac{4G_1}{\rho_{g1} \pi d_1^2 3600} = \frac{4 \cdot 2130}{976 \cdot 3,14 (3,2 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 3600} = 0,755 \text{ м/с};$$

$$w_2 = \frac{4G_2}{\rho_{g2} \pi (D^2 - d_1^2) 3600} = \frac{4 \cdot 3200}{996 \cdot 3,14 (4,8^2 - 3,5^2) 10^{-4} \cdot 3600} = 1,06 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса для потока греющей воды

$$\text{Re}_{g1} = \frac{w_1 d_1}{\nu_{g1}} = \frac{0,755 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}}{0,403 \cdot 10^{-6}} = 6 \cdot 10^4.$$

Режим течения греющей воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта по формуле:

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021 \text{Re}_{g1}^{0,8} \text{Pr}_{g1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25}.$$

Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся значением

$$t_{c1} \approx 0,5(t_{g1} + t_{g2}) = 0,5(72,5 + 30) = 51,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При этой температуре $\text{Pr}_{c1} = 3,5$, тогда

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021(6 \cdot 10^4)^{0,8} (2,47)^{0,43} \left(\frac{2,47}{3,5} \right)^{0,25} = 188.$$

Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы

$$\alpha_1 = \text{Nu}_{g1} \frac{\lambda_{g1}}{d_1} = 188 \frac{0,670}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 3940 \text{ Вт/(м}^2\text{ } ^\circ\text{C)}.$$

Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды

$$\text{Re}_{g2} = \frac{w_2 d_2}{\nu_{g2}} = \frac{1,06 \cdot 1,3 \cdot 10^{-2}}{0,805 \cdot 10^{-6}} = 1,71 \cdot 10^4,$$

где эквивалентный диаметр для кольцевого канала

$$d_{eq} = D - d_2 = 48 - 35 = 13 \text{ мм}.$$

Режим течения нагреваемой воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении в каналах кольцевого сечения:

$$\text{Nu}_{g2} = 0,017 \text{Re}_{g2}^{0,8} \text{Pr}_{g2}^{0,4} \left(\frac{\text{Pr}_{g2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{d_2} \right)^{0,18}.$$

Приняв в первом приближении $t_{c2} \approx t_{c1}$ и, следовательно, $\text{Pr}_{c2} \approx \text{Pr}_{c1} \approx 3,5$, получим:

$$\text{Nu}_{g2} = 0,017(1,71 \cdot 10^4)^{0,8} (5,42)^{0,4} \left(\frac{5,42}{3,5} \right)^{0,25} \left(\frac{48}{35} \right)^{0,18} = 95.$$

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой воде

$$\alpha_2 = \text{Nu}_{g2} \frac{\lambda_{g2}}{d_g} = 95 \frac{0,618}{1,3 \cdot 10^{-2}} = 4500 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}.$$

Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{3940} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{4500}} = 1970 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}.$$

Так как в рассматриваемом случае

$$\frac{t'_{g1} - t''_{g2}}{t''_{g1} - t'_{g2}} = \frac{50}{35} < 1,5,$$

то с достаточной точностью можно вести расчет по среднеарифметической разности температур:

$$\Delta t_a = t_{g1} - t_{g2} = 72,5 - 30 = 42,5 \text{ °C}.$$

Плотность теплового потока

$$q = k \Delta t_a = 1970 \cdot 42,5 = 8,37 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Площадь поверхности нагрева

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{111}{83,7} = 1,33 \text{ м}^2.$$

Число секций

$$n = \frac{F}{\pi d_1 l} = \frac{1,33}{\pi \cdot 3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 1,9} \approx 7.$$

Температуры поверхностей стенок трубы

$$t_{c1} = t_{g1} - \frac{q}{\alpha_1} = 72,5 - \frac{83700}{3940} = 51,3 \text{ °C};$$

$$t_{c2} = t_{g2} + \frac{q}{\alpha_2} = 30 + \frac{83700}{4500} = 48,6 \text{ °C}.$$

При этих температурах $\text{Pr}_{c1} = 3,47$ и $\text{Pr}_{c2} = 3,65$.

Поправки на изменение физических свойств жидкости по сечению потока имеют следующие значения:

$$\left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}}\right)^{0,25} = \left(\frac{2,47}{3,47}\right)^{0,25} = 0,915 \text{ (в расчете было принято } 0,92\text{);}$$

$$\left(\frac{\text{Pr}_{g2}}{\text{Pr}_{c2}}\right)^{0,25} = \left(\frac{5,42}{3,65}\right)^{0,25} = 1,10 \text{ (в расчете было принято } 1,12\text{).}$$

Совпадение достаточно точное; можно принять что

$$F = 1,33 \text{ м}^2 \text{ и } n = 7.$$

Вычислим перепад давления по формуле Дарси-Вейсбаха

$$\Delta P = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho w^2}{2} \text{ Па, где } \lambda = \frac{0,316}{\text{Re}^{0,25}}.$$

Имеем:

в трубном пространстве

$$\lambda_1 = \frac{0,316}{\text{Re}_1^{0,25}} = \frac{0,316}{(6 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,02;$$

$$\Delta P_1 = \lambda_1 \frac{l}{d_1} \cdot \frac{\rho w_1^2}{2} = 0,02 \cdot \frac{13,236}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{976 \cdot 0,755^2}{2} = 2301 \text{ Па;}$$

в межтрубном пространстве

$$\lambda_2 = \frac{0,316}{\text{Re}_2^{0,25}} = \frac{0,316}{(1,71 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,0276;$$

$$\Delta P_2 = \lambda_2 \frac{l}{d_{eq}} \cdot \frac{\rho w_2^2}{2} = 0,0276 \cdot \frac{13,236}{1,3 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{996 \cdot 1,06^2}{2} = 15724 \text{ Па.}$$

Общий перепад давления по аппарату

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 2301 + 15724 = 18025 \text{ Па.}$$

Таким образом, площадь поверхности нагрева водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе» составит $1,3 \text{ м}^2$, а число секций равно 7.

8.2. Расчет водо-водяного цилиндрического змеевикowego теплообменника типа «труба в трубе»

Расчет теплоотдачи в криволинейном канале производится по формулам для прямолинейного канала с учетом поправочного коэффициента [183]:

$$\alpha_{iz} = \varepsilon \cdot \alpha_{pr}, \quad (8.1)$$

где α_{iz} , α_{pr} – коэффициенты теплоотдачи в изогнутом и прямом канале, Вт/(м²·°C); ε – поправочный коэффициент.

Впервые такой подход при обработке опытных данных был реализован в работе [183], где поправочный коэффициент рассчитывался по формуле:

$$\varepsilon = 1 + 3,54 \frac{d}{2R}, \quad (8.2)$$

здесь d – внутренний диаметр канала, м; R – радиус кривизны канала, м.

Согласно данным [184] величина поправочного коэффициента в турбулентной области может быть определена из соотношения

$$\varepsilon = 1 + \frac{21}{Re^{0,14}} \left(\frac{d}{2R} \right)^{0,48}, \quad (8.3)$$

где Re – критерий Рейнольдса.

В последующем установлено, что результаты расчета поправочного коэффициента по (8.2) и (8.3) совпадают при $Re > 10^5$.

Сопоставив большое количество литературных данных авторы [185] пришли к выводу, что отношение $0,5d/R$ в (8.3) необходимо возвести в степень с показателем 0,5–0,75. В работе [186] предложено вычислять поправочный коэффициент ε по формуле:

$$\varepsilon = 1 + \frac{1,96}{Re^{0,088}} \left(\frac{d}{R} \right)^{0,01}, \quad (8.4)$$

где $0,01 \leq \frac{d}{R} \leq 1$, $10^4 \leq Re \leq 10^5$.

Следует отметить тот факт, что в настоящее время нет общепризнанного соотношения для расчета поправочного коэффициента ε .

Определим площадь поверхности нагрева и число витков змеевикового водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе» (рис. 85–86).

Греющая вода движется по внутренней стальной трубе [$\lambda_c = 45 \text{ Вт/(м}^\circ\text{С)}$] диаметром $d_2/d_1 = 35/32 \text{ мм}$ и имеет температуру на входе $t'_{g1} = 95^\circ\text{С}$.

Расход греющей воды $G_1 = 2130 \text{ кг/ч}$.

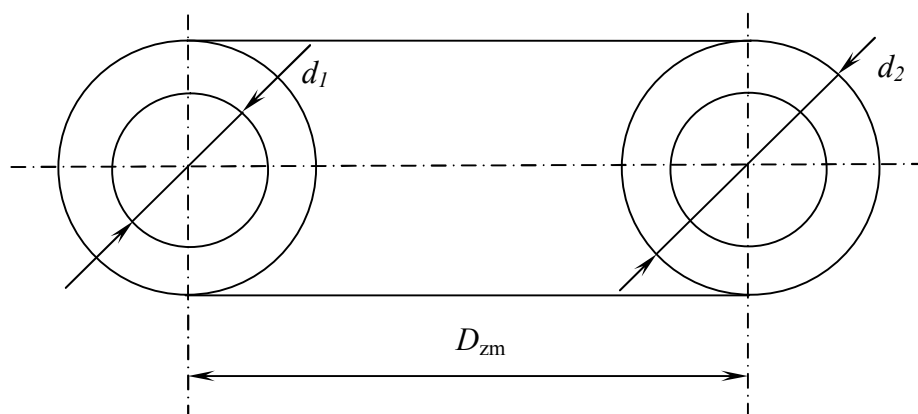


Рис. 85. Геометрические параметры змеевикового теплообменника типа «труба в трубе»

Нагреваемая вода движется противотоком по кольцевому каналу между трубами и нагревается от $t'_{g2} = 15^\circ\text{С}$ до $t''_{g2} = 45^\circ\text{С}$. Внутренний диаметр внешней трубы $D = 48 \text{ мм}$.

Расход нагреваемой воды $G_2 = 3200 \text{ кг/ч}$.

Потерями теплоты через внешнюю поверхность теплообменника пренебречь.

Расчет произведем для змеевика, диаметром $D_{zm} = 600$ мм.

Поправочный коэффициент вычислим по выражению (8.2), коэффициент теплоотдачи – по формуле (8.1).

Для трубного пространства

$$\varepsilon_1 = 1 + 3,54 \frac{d_1}{D_{zm}} = 1 + 3,54 \frac{0,032}{0,6} = 1,189;$$

$$\alpha_1 = \varepsilon \cdot \alpha_{pr} = 1,189 \cdot 3940 = 4684;$$

для межтрубного пространства

$$\varepsilon_2 = 1 + 3,54 \frac{D}{D_{zm}} = 1 + 3,54 \frac{0,048}{0,6} = 1,2832;$$

$$\alpha_2 = \varepsilon \cdot \alpha_{pr} = 1,2832 \cdot 4500 = 5774.$$

Коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{4684} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{5774}} = 2384 \text{ Вт/(м}^2\text{°С)}.$$

Так как в рассматриваемом случае

$$\frac{t'_{g1} - t''_{g2}}{t''_{g1} - t'_{g2}} = \frac{50}{35} < 1,5,$$

то с достаточной точностью можно вести расчет по среднеарифметической разности температур:

$$\Delta t_a = t_{g1} - t_{g2} = 72,5 - 30 = 42,5 \text{ } ^\circ\text{С}.$$

Плотность теплового потока

$$q = k \Delta t_a = 2384 \cdot 42,5 = 10,134 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

$$\text{Площадь поверхности нагрева } F = \frac{Q}{q} = \frac{111}{101,34} = 1,095 \text{ м}^2.$$

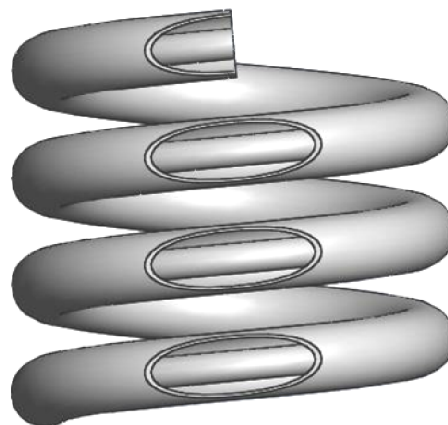


Рис. 86. Фрагмент цилиндрического змеевикового теплообменника типа «труба в трубе»

Длина змеевика

$$l = \frac{F}{\pi d_1} = \frac{1,095}{3,14 \cdot 0,032} = 10,9 \text{ м.}$$

Пусть расстояние между витками змеевика

$$h = 4 \cdot d_2 = 0,14 \text{ м,}$$

тогда длина витка змеевика

$$l_1 = \sqrt{(\pi \cdot D_{zm})^2 + h^2} = \sqrt{3,5691} = 1,889 \text{ м.}$$

Число витков

$$n = \frac{l}{l_1} = \frac{10,9}{1,889} = 5,77 \approx 6.$$

$$\Delta P_{zm1} = \varepsilon_1 \cdot \Delta P_1 = 1,189 \cdot 2301 = 2736 \text{ Па.}$$

$$\Delta P_{zm2} = \varepsilon_2 \cdot \Delta P_2 = 1,2832 \cdot 15724 = 20177 \text{ Па.}$$

Общий перепад давления по аппарату

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 = 2736 + 20177 = 22913 \text{ Па.}$$

Таким образом, площадь поверхности нагрева змеевикового водоводяного теплообменника типа «труба в трубе» составит $1,095 \text{ м}^2$, а число витков – 6.

8.3. Расчет водо-водяного змеевикового теплообменника типа «труба в трубе», выполненного на конус

Проведем расчет змеевикового теплообменника типа «труба в трубе», выполненного на конус (рис. 87) по следующему методу.

Разобьем изменение температуры по длине трубы на интервалы $45 - 35 \text{ } ^\circ\text{C}$, $35 - 25 \text{ } ^\circ\text{C}$, $25 - 15 \text{ } ^\circ\text{C}$.

На каждом из этих интервалов проведем расчет соответствующей «части» конического теплообменника по методу, применяемому для расчета цилиндрических змеевиков.

1. Рассмотрим интервал $45 - 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Здесь $t'_{g2} = 35 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $t''_{g2} = 45 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Пусть меньший диаметр змеевика на конус $D_{zm}^1 = 0,3 \text{ м}$, угол конусности $\varphi = \pi/24$.

Вычислим поправочные коэффициенты:

$$\varepsilon_1 = 1 + 3,54 \frac{d_1}{D_{zm}^1} = 1 + 3,54 \frac{0,032}{0,3} = 1,3776;$$

$$\varepsilon_2 = 1 + 3,54 \frac{D}{D_{zm}^1} = 1 + 3,54 \frac{0,048}{0,3} = 1,5664.$$



Рис. 87. Змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе», выполненный на конус

Количество передаваемой теплоты

$$Q = G_2 c_{p2} (t''_{g2} - t'_{g2}) = \frac{3200}{3600} 4,19 (45 - 35) = 37,096 \text{ кВт.}$$

Температура греющей воды на выходе

$$t''_{g1} = t'_{g1} - \frac{Q}{G_1 c_{p1}} = 95 \frac{37,096 \cdot 3600}{2130 \cdot 4,19} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Находим среднеарифметические значения температур теплоносителей и значения физических свойств воды при этих температурах:

$$t_{g1} = 0,5(t'_{g1} + t''_{g1}) = 0,5(95 + 80) = 87,5 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\rho_{g1} = 962 \text{ кг/м}^3;$$

$$\nu_{g1} = 0,335 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g1} = 0,6786 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}; \text{ Pr}_{g1} = 2,01.$$

$$t_{g2} = 0,5(t'_{g2} + t''_{g2}) = 0,5(35 + 45) = 40 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\rho_{g2} = 994 \text{ кг/м}^3;$$

$$\nu_{g2} = 0,659 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g2} = 0,635 \text{ Вт/(м} \cdot ^{\circ}\text{C)}; \text{ Pr}_{g2} = 4,31.$$

Скорости движения теплоносителей

$$w_1 = \frac{4G_1}{\rho_{g1}\pi d_1^2 3600} = 0,7648 \text{ м/с};$$

$$w_2 = \frac{4G_2}{\rho_{g2}\pi(D^2 - d_1^2)3600} = 1,055 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса для потока греющей воды

$$\text{Re}_{g1} = \frac{w_1 d_1}{\nu_{g1}} = 7,3075 \cdot 10^4.$$

Режим течения греющей воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021 \text{Re}_{g1}^{0,8} \text{Pr}_{g1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25}.$$

Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся значением

$$t_{c1} \approx 0,5(t_{g1} + t_{g2}) = 0,5(87,5 + 40) = 63,75 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При этой температуре $\text{Pr}_{c1} = 2,81$, тогда

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021 \text{Re}_{g1}^{0,8} \text{Pr}_{g1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25} = 202,85.$$

Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы с учетом поправочного коэффициента (Иешке)

$$\alpha_{11} = \varepsilon_1 \text{Nu}_{g1} \frac{\lambda_{g1}}{d_1} = \frac{1,3776 \cdot 202,85 \cdot 0,6786}{3,2 \cdot 10^{-2}} = 5926 \text{ Вт/(м}^2\text{}^\circ\text{C)}.$$

Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды

$$\text{Re}_{g2} = \frac{w_2 d_2}{\nu_{g2}} = 2,0816 \cdot 10^4,$$

где эквивалентный диаметр для кольцевого канала

$$d_{eq} = D - d_2 = 48 - 35 = 13 \text{ мм}.$$

Режим течения нагреваемой воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении в каналах кольцевого сечения [182]:

$$\text{Nu}_{g2} = 0,017 \text{Re}_{g2}^{0,8} \text{Pr}_{g2}^{0,4} \left(\frac{\text{Pr}_{g2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{d_2} \right)^{0,18}.$$

Приняв в первом приближении $t_{c2} \approx t_{c1}$ и, следовательно, $\text{Pr}_{c2} \approx \text{Pr}_{c1} \approx 2,81$, получим $\text{Nu}_{g2} = 102,38$.

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой воде с учетом поправочного коэффициента

$$\alpha_{21} = \varepsilon_2 \text{Nu}_{g2} \frac{\lambda_{g2}}{d_{eq}} = \frac{1,5664 \cdot 102,38 \cdot 0,635}{1,3 \cdot 10^{-2}} = 7833 \text{ Вт/(м}^2 \text{°C)}.$$

Коэффициент теплопередачи

$$k_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{11}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{21}}} = \frac{1}{\frac{1}{5926} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{7833}} = 3033 \text{ Вт/(м}^2 \text{°C)}.$$

Вычислим среднеарифметическую разность температур:

$$\Delta t_a = t_{g1} - t_{g2} = 47,5 \text{ °C}.$$

Плотность теплового потока

$$q = k \Delta t_a = 1,44 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Площадь поверхности нагрева

$$F = \frac{Q}{q} = \frac{37,096}{14,4} = 0,2576 \text{ м}^2.$$

Температуры поверхностей стенок трубы

$$t_{c1} = t_{g1} - \frac{q}{\alpha_{11}} = 63,185 \text{ °C};$$

$$t_{c2} = t_{g2} + \frac{q}{\alpha_{21}} = 58,385 \text{ °C}.$$

При этих температурах $Pr_{c1} = 2,83$, $Pr_{c2} = 3,06$ и поправки на изменение физических свойств жидкости по сечению потока имеют следующие значения:

$$\left(\frac{Pr_{g1}}{Pr_{c1}}\right)^{0,25} = \left(\frac{2,01}{2,83}\right)^{0,25} = 0,918 \text{ (в расчете было принято } 0,919\text{);}$$

$$\left(\frac{Pr_{g2}}{Pr_{c2}}\right)^{0,25} = \left(\frac{4,31}{3,06}\right)^{0,25} = 1,089 \text{ (в расчете было принято } 1,11\text{).}$$

Совпадение достаточно точное; можно принять что

$$F_1 = 0,2576 \text{ м}^2.$$

Длина трубы

$$l_1 = \frac{F_1}{\pi d_1} = \frac{0,2576}{3,14 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}} = 2,5637 \text{ м.}$$

Перепады давлений

$$\lambda_{11} = \frac{0,316}{Re_1^{0,25}} = \frac{0,316}{(7,3075 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,019.$$

$$\Delta P_{11} = \lambda_{11} \frac{l_1}{d_1} \cdot \frac{\rho w_1^2}{2} = 0,019 \cdot \frac{2,5637}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{962 \cdot 0,7648^2}{2} = 428,26 \text{ Па.}$$

$$\lambda_{21} = \frac{0,316}{Re_2^{0,25}} = \frac{0,316}{(2,0816 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,0263.$$

$$\Delta P_{21} = \lambda_{21} \frac{l_1}{d_2} \cdot \frac{\rho w_2^2}{2} = 0,0263 \cdot \frac{2,5637}{1,3 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{994 \cdot 1,055^2}{2} = 2869 \text{ Па.}$$

$$\Delta P_1 = \varepsilon_1 \cdot \Delta P_{11} + \varepsilon_2 \cdot \Delta P_{21} = 1,3776 \cdot 428,26 + 1,5664 \cdot 2869 = 5098 \text{ Па.}$$

2. Рассмотрим интервал $35 - 25^\circ \text{C}$.

Здесь $t'_{g2} = 25^\circ \text{C}$, $t''_{g2} = 35^\circ \text{C}$. Диаметр змеевика $D_{zm}^2 = 0,4 \text{ м}$.

Вычислим поправочные коэффициенты:

$$\varepsilon_1 = 1 + 3,54 \frac{d_1}{D_{zm}^2} = 1,2838;$$

$$\varepsilon_2 = 1 + 3,54 \frac{D}{D_{zm}^2} = 1,4257.$$

Количество передаваемой теплоты

$$Q = G_2 c_{p2} (t''_{g2} - t'_{g2}) = 37,138 \text{ кВт}.$$

Температура греющей воды на выходе

$$t''_{g1} = t'_{g1} - \frac{Q}{G_1 c_{p1}} = 64,95 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Находим среднеарифметические значения температур теплоносителей и значения физических свойств воды при этих температурах [162]:

$$t_{g1} = 0,5(t'_{g1} + t''_{g1}) = 0,5(80 + 64,95) = 72,465 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\rho_{g1} = 972 \text{ кг/м}^3;$$

$$\nu_{g1} = 0,4015 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g1} = 0,6697 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)};$$

$$\text{Pr}_{g1} = 2,4585;$$

$$t_{g2} = 0,5(t'_{g2} + t''_{g2}) = 0,5(25 + 35) = 30 \text{ }^\circ\text{C};$$

$$\rho_{g2} = 997 \text{ кг/м}^3;$$

$$\nu_{g2} = 0,805 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g2} = 0,618 \text{ Вт/(м}^\circ\text{C)}.$$

$$\text{Pr}_{g2} = 5,42.$$

Скорости движения теплоносителей

$$w_1 = \frac{4G_1}{\rho_{g1} \pi d_1^2 3600} = 0,757 \text{ м/с};$$

$$w_2 = \frac{4G_2}{\rho_{g2} \pi (D^2 - d_1^2) 3600} = 1,052 \text{ м/с}.$$

Число Рейнольдса для потока греющей воды

$$\text{Re}_{g1} = \frac{w_1 d_1}{\nu_{g1}} = 6,0331 \cdot 10^4.$$

Режим течения греющей воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта по формуле:

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021 \text{Re}_{g1}^{0,8} \text{Pr}_{g1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25}.$$

Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся значением

$$t_{c1} \approx 0,5(t_{g1} + t_{g2}) = 0,5(72,465 + 30) = 51,232 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

При этой температуре $\text{Pr}_{c1} = 3,462$, тогда

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021 \text{Re}_{g1}^{0,8} \text{Pr}_{g1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25} = 189,45.$$

Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы

$$\alpha_{12} = \varepsilon_1 \text{Nu}_{g1} \frac{\lambda_{g1}}{d_1} = 5090 \text{ Вт/(м}^2\text{ } ^\circ\text{C)}.$$

Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды

$$\text{Re}_{g2} = \frac{w_2 d_2}{\nu_{g2}} = 1,6988 \cdot 10^4.$$

Режим течения нагреваемой воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении в каналах кольцевого сечения:

$$\text{Nu}_{g2} = 0,017 \text{Re}_{g2}^{0,8} \text{Pr}_{g2}^{0,4} \left(\frac{\text{Pr}_{g2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{d_2} \right)^{0,18}.$$

Приняв в первом приближении $t_{c2} \approx t_{c1}$ и, следовательно, $\text{Pr}_{c2} \approx \text{Pr}_{c1} \approx 3,462$, получим $\text{Nu}_{g2} = 95,838$.

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой воде

$$\alpha_{22} = \varepsilon_2 \text{Nu}_{g2} \frac{\lambda_{g2}}{d_{eq}} = 6496 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}.$$

Коэффициент теплопередачи

$$k_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{12}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{22}}} = \frac{1}{\frac{1}{5090} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{6496}} = 2605 \text{ Вт/(м}^2\text{°C)}.$$

Вычислим среднеарифметическую разность температур:

$$\Delta t_a = t_{g1} - t_{g2} = 42,465 \text{ °C}.$$

Плотность теплового потока

$$q = k \Delta t_a = 1,1065 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2.$$

Площадь поверхности нагрева

$$F = \frac{Q}{q} = 0,33562 \text{ м}^2.$$

Температуры поверхностей стенок трубы

$$t_{c1} = t_{g1} - \frac{q}{\alpha_{12}} = 50,724 \text{ °C};$$

$$t_{c2} = t_{g2} + \frac{q}{\alpha_{22}} = 47,035 \text{ °C}.$$

При этих температурах $\text{Pr}_{c1} = 3,4937$, $\text{Pr}_{c2} = 3,74$ и поправки на изменение физических свойств жидкости по сечению потока имеют следующие значения:

$$\left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25} = \left(\frac{2,4582}{3,4937} \right)^{0,25} = 0,9159 \text{ (в расчете было принято } 0,917\text{)};$$

$$\left(\frac{\text{Pr}_{g2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25} = \left(\frac{5,42}{3,74} \right)^{0,25} = 1,097 \text{ (в расчете было принято } 1,1186\text{)}.$$

Совпадение достаточно точное; можно принять что $F_2 = 0,33562 \text{ м}^2$.

$$l_2 = \frac{F_2}{\pi d_1} = \frac{0,33562}{3,14 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}} = 3,34 \text{ м.}$$

$$\lambda_{12} = \frac{0,316}{\text{Re}_1^{0,25}} = \frac{0,316}{(6,033 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,02.$$

$$\Delta P_{12} = \lambda_{12} \frac{l_2}{d_1} \cdot \frac{\rho w_1^2}{2} = 0,02 \cdot \frac{3,34}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{972 \cdot 0,757^2}{2} = 581 \text{ Па.}$$

$$\lambda_{22} = \frac{0,316}{\text{Re}_2^{0,25}} = \frac{0,316}{(1,6988 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,028.$$

$$\Delta P_{22} = \lambda_{22} \frac{l_2}{d_2} \cdot \frac{\rho w_2^2}{2} = 0,028 \cdot \frac{3,34}{1,3 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{997 \cdot 1,052^2}{2} = 3969 \text{ Па.}$$

$$\Delta P_2 = \varepsilon_1 \cdot \Delta P_{12} + \varepsilon_2 \cdot \Delta P_{22} = 1,2838 \cdot 581 + 1,4257 \cdot 3969 = 6404 \text{ Па.}$$

3. Рассмотрим интервал $25 - 15^\circ \text{C}$. Здесь $t'_{g2} = 15^\circ \text{C}$, $t''_{g2} = 25^\circ \text{C}$.

Диаметр змеевика $D_{zm}^3 = 0,4967 \text{ м.}$

Вычислим поправочные коэффициенты:

$$\varepsilon_1 = 1 + 3,54 \frac{d_1}{D_{zm}^3} = 1,2281;$$

$$\varepsilon_2 = 1 + 3,54 \frac{D}{D_{zm}^3} = 1,3421.$$

Количество передаваемой теплоты

$$Q = G_2 c_{p2} (t''_{g2} - t'_{g2}) = 37,216 \text{ кВт.}$$

Температура греющей воды на выходе

$$t''_{g1} = t'_{g1} - \frac{Q}{G_1 c_{p1}} = 49,93^\circ \text{C}.$$

Находим среднеарифметические значения температур теплоносителей и значения физических свойств воды при этих температурах:

$$t_{g1} = 0,5(t'_{g1} + t''_{g1}) = 57,44^\circ \text{C}; \quad \rho_{g1} = 981 \text{ кг/м}^3;$$

$$\nu_{g1} = 0,4963 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g1} = 0,6563 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C}); \text{Pr}_{g1} = 3,1085;$$

$$t_{g2} = 0,5(t'_{g2} + t''_{g2}) = 0,5(15 + 25) = 20 \text{ }^{\circ}\text{C};$$

$$\rho_{g2} = 999 \text{ кг}/\text{м}^3; \nu_{g2} = 1,006 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

$$\lambda_{g2} = 0,599 \text{ Вт}/(\text{м}^{\circ}\text{C}); \text{Pr}_{g2} = 7,02.$$

Скорости движения теплоносителей

$$w_1 = \frac{4G_1}{\rho_{g1}\pi d_1^2 3600} = 0,75 \text{ м}/\text{с};$$

$$w_2 = \frac{4G_2}{\rho_{g2}\pi(D^2 - d_1^2) 3600} = 1,05 \text{ м}/\text{с}.$$

Число Рейнольдса для потока греющей воды

$$\text{Re}_{g1} = \frac{w_1 d_1}{\nu_{g1}} = 4,8372 \cdot 10^4.$$

Режим течения греющей воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021 \text{Re}_{g1}^{0,8} \text{Pr}_{g1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25}.$$

Так как температура стенки неизвестна, то в первом приближении задаемся значением

$$t_{c1} \approx 0,5(t_{g1} + t_{g2}) = 0,5(57,44 + 20) = 38,72 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

При этой температуре $\text{Pr}_{c1} = 4,431$, тогда

$$\text{Nu}_{g1} = 0,021 \text{Re}_{g1}^{0,8} \text{Pr}_{g1}^{0,43} \left(\frac{\text{Pr}_{g1}}{\text{Pr}_{c1}} \right)^{0,25} = 175.$$

Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы

$$\alpha_{13} = \varepsilon_1 \text{Nu}_{g1} \frac{\lambda_{g1}}{d_1} = 4410 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ }^{\circ}\text{C}).$$

Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды

$$\text{Re}_{g2} = \frac{w_2 d_2}{\nu_{g2}} = 1,3567 \cdot 10^4.$$

Режим течения нагреваемой воды турбулентный. Вычислим число Нуссельта и коэффициент теплоотдачи при турбулентном течении в каналах кольцевого сечения:

$$\text{Nu}_{g2} = 0,017 \text{Re}_{g2}^{0,8} \text{Pr}_{g2}^{0,4} \left(\frac{\text{Pr}_{g2}}{\text{Pr}_{c2}} \right)^{0,25} \left(\frac{D}{d_2} \right)^{0,18}.$$

Приняв в первом приближении $t_{c2} \approx t_{c1}$ и, следовательно, $\text{Pr}_{c2} \approx \text{Pr}_{c1} \approx 4,431$, получим $\text{Nu}_{g2} = 89$.

Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой воде

$$\alpha_{23} = \varepsilon_2 \text{Nu}_{g2} \frac{\lambda_{g2}}{d_{eq}} = 5507 \text{ Вт/(м}^2 \text{°C)}.$$

Коэффициент теплопередачи

$$k_3 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{13}} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_{23}}} = \frac{1}{\frac{1}{4410} + \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{45} + \frac{1}{5507}} = 2264 \text{ Вт/(м}^2 \text{°C)}.$$

Вычислим разность температур: $\Delta t_a = t_{g1} - t_{g2} = 37,44 \text{ °C}$.

Плотность теплового потока

$$q = k \Delta t_a = 8,4767 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2.$$

Площадь поверхности нагрева

$$F = \frac{Q}{q} = 0,439 \text{ м}^2.$$

Температуры поверхностей стенок трубы

$$t_{c1} = t_{g1} - \frac{q}{\alpha_{13}} = 38,22 \text{ °C};$$

$$t_{c2} = t_{g2} + \frac{q}{\alpha_{23}} = 35,39 \text{ °C}.$$

При этих температурах $Pr_{c1} = 4,4795$, $Pr_{c2} = 4,7724$. Поправки на изменение физических свойств жидкости по сечению потока имеют следующие значения:

$$\left(\frac{Pr_{g1}}{Pr_{c1}}\right)^{0,25} = \left(\frac{2,4582}{4,4795}\right)^{0,25} = 0,86 \text{ (в расчете было принято } 0,863\text{)};$$

$$\left(\frac{Pr_{g2}}{Pr_{c2}}\right)^{0,25} = \left(\frac{7,02}{4,7724}\right)^{0,25} = 1,1013 \text{ (в расчете было принято } 1,1219\text{)}.$$

Совпадение достаточно точное; можно принять что $F_3 = 0,439 \text{ м}^2$.

$$l_3 = \frac{F_3}{\pi d_1} = \frac{0,439}{3,14 \cdot 3,2 \cdot 10^{-2}} = 4,369 \text{ м.}$$

$$\lambda_{13} = \frac{0,316}{Re_1^{0,25}} = \frac{0,316}{(4,8372 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,021.$$

$$\Delta P_{13} = \lambda_{13} \frac{l_3}{d_1} \cdot \frac{\rho w_1^2}{2} = 0,021 \cdot \frac{4,369}{3,2 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{981 \cdot 0,75^2}{2} = 791 \text{ Па.}$$

$$\lambda_{23} = \frac{0,316}{Re_2^{0,25}} = \frac{0,316}{(1,3567 \cdot 10^4)^{0,25}} = 0,029.$$

$$\Delta P_{23} = \lambda_{23} \frac{l_3}{d_3} \cdot \frac{\rho w_2^2}{2} = 0,029 \cdot \frac{4,369}{1,3 \cdot 10^{-2}} \cdot \frac{999 \cdot 1,05^2}{2} = 5420 \text{ Па.}$$

$$\Delta P_3 = \varepsilon_1 \cdot \Delta P_{13} + \varepsilon_2 \cdot \Delta P_{23} = 1,2281 \cdot 791 + 1,3421 \cdot 5420 = 8246 \text{ Па.}$$

Общий перепад давления по аппарату составит:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \Delta P_3 = 5098 + 6404 + 8246 = 19748 \text{ Па.}$$

Общая площадь теплообмена

$$F = F_1 + F_2 + F_3 = 0,2576 + 0,33562 + 0,439 = 1,0322 \text{ м}^2.$$

Средневзвешенный коэффициент теплоотдачи для трубного пространства

$$\alpha_1^* = \frac{\alpha_{11} \cdot F_1 + \alpha_{12} \cdot F_2 + \alpha_{13} \cdot F_3}{F} = \frac{5926 \cdot 0,2576 + 5090 \cdot 0,33562 + 4410 \cdot 0,439}{1,0322} = 5009 \text{ Вт/(м}^2 \text{°C)};$$

для межтрубного пространства

$$\alpha_2^* = \frac{\alpha_{21} \cdot F_1 + \alpha_{22} \cdot F_2 + \alpha_{23} \cdot F_3}{F} =$$

$$= \frac{7833 \cdot 0,2576 + 6496 \cdot 0,33562 + 5507 \cdot 0,439}{1,0322} = 6409 \text{ Вт/(м}^2 \text{°C)}.$$

Вычислим средневзвешенную оценку коэффициента теплопередачи:

$$k^* = \frac{k_1 \cdot F_1 + k_2 \cdot F_2 + k_3 \cdot F_3}{F} =$$

$$= \frac{3033 \cdot 0,2576 + 2605 \cdot 0,33562 + 2264 \cdot 0,439}{1,0322} = 2567 \text{ Вт/(м}^2 \text{°C)}.$$

Диаметр D_{zm}^1 верхнего основания змеевика, выполненного на конус равен 0,3 м, диаметр D_{zm}^4 нижнего основания – 0,6 м, а длина змеевика

$$l = \frac{F}{\pi d_1} = \frac{1,0322}{3,14 \cdot 0,032} = 10,27 \text{ м.}$$

Результаты расчетов сведем в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики теплообменного аппарата	Теплообменник типа «труба в трубе» прямолинейный	Теплообменник типа «труба в трубе» змеевиковый цилиндрический	Теплообменник типа «труба в трубе», выполненный на конус
Коэффициент теплоотдачи α_1 , Вт/(м ² °C)	3940	4684	5009
Коэффициент теплоотдачи α_2 , Вт/(м ² °C)	4500	5774	6409
Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² °C)	1970	2384	2567
Площадь теплообменной поверхности F , м ²	1,33	1,095	1,0322
Длина трубы l , м	13,236	10,9	10,27
Перепад давления ΔP , Па	18025	22913	19748

Таким образом, змеевиковый теплообменник типа «труба в трубе», выполненный на конус имеет преимущества по сравнению с теплообменником с прямыми трубами и цилиндрическим змеевиковым теплообменником, соответственно, по площади теплообмена:

$$\left(\frac{1,33 - 1,032}{1,33} \right) \cdot 100\% \approx 22,4\%;$$

$$\left(\frac{1,095 - 1,032}{1,095} \right) \cdot 100\% \approx 5,8\%;$$

по коэффициенту теплопередачи:

$$\left(\frac{2567 - 1970}{2567} \right) \cdot 100\% \approx 23,3\%;$$

$$\left(\frac{2567 - 2384}{2567} \right) \cdot 100\% \approx 7,13\%;$$

по перепаду давления:

$$\left(\frac{19748 - 18025}{18025} \right) \cdot 100\% \approx 9,56\%;$$

$$\left(\frac{22913 - 19748}{22913} \right) \cdot 100\% \approx 13,81\%.$$

Для расчета водо-водяного змеевикового теплообменника типа «труба в трубе», выполненного на конус, была разработана программа в системе Matlab. Программа позволяет проводить расчеты водо-водяного змеевикового теплообменника, выполненного на конус с различными геометрическими размерами и при различных исходных данных.

Так, например, при разбиении температуры по длине трубы на температурные интервалы в 5 °С имеем:

коэффициент теплоотдачи для трубного пространства

$$\alpha_1^* = 4939 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ °С});$$

– коэффициент теплоотдачи для межтрубного пространства

$$\alpha_2^* = 6308 \text{ Вт/(м}^2\text{°С)};$$

– диаметр верхнего основания конуса

$$D_{zm}^1 = 0,3 \text{ м};$$

– диаметр нижнего основания конуса

$$D_{zm}^4 = 0,589 \text{ м};$$

– коэффициент теплопередачи

$$k^* = 2532 \text{ Вт/(м}^2\text{°С)};$$

– длину трубы

$$l = 10,42 \text{ м};$$

– площадь теплообмена $F = 1,047 \text{ м}^2$.

С целью оптимизации геометрии проточной части змеевикового теплообменника, интенсификации теплообмена, снижения массы и габаритов аппарата предлагается выполнить внешний контур по криволинейному закону, в том числе по параболической или гиперболической кривой (рис. 88, 89).

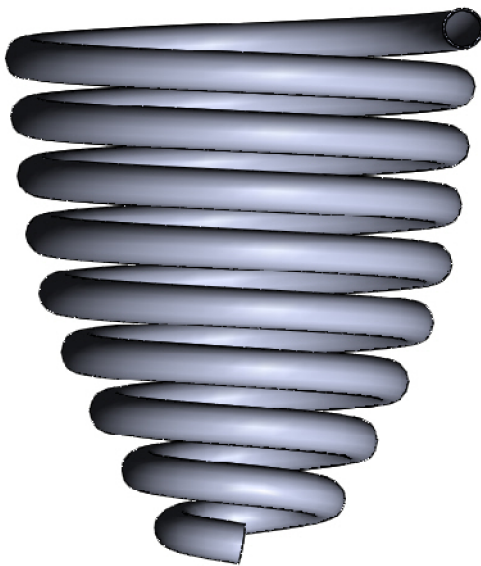


Рис. 88. Параболический змеевик

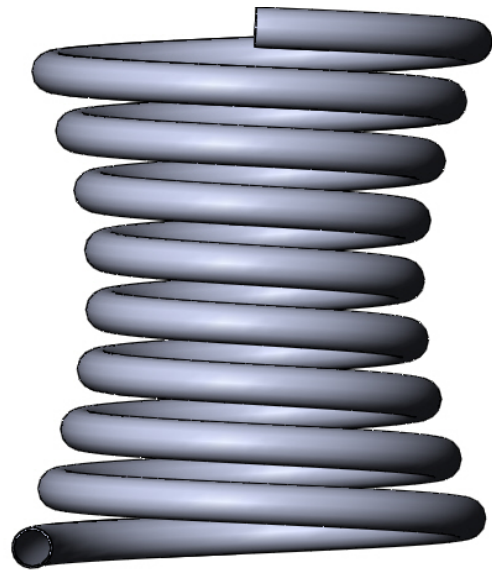


Рис. 89. Гиперболический змеевик

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В монографии рассмотрены основные тенденции развития технологии сварки элементов трубчатых теплообменников; показана перспектива использования в производстве теплообменного оборудования с теплообменными элементами в виде пружинно-витых каналов лазерной сварки, характеризуемой наименьшим тепловложением, являющейся более эффективной и менее материалозатратной.

На базе фундаментальных положений аналитической и дифференциальной геометрии предложен метод описания теплообменной поверхности змеевиковых аппаратов и пружинно-витых каналов различных конфигураций. Проведен анализ степени развития поверхностей теплообменных элементов в зависимости от геометрических параметров исходного профиля, формирующего винтовую поверхность.

Предложен класс цилиндрических змеевиковых теплообменников, а также серия аппаратов, внешний контур которых выполнен в виде усеченных конусов или в форме шара с цилиндрическими трубами или трубами на конус.

Разработана математическая модель сопряженной задачи теплообмена при турбулентном течении вязкой жидкости в змеевиках с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали, при этом предложена специальная система координат, учитывающая естественную симметрию канала.

Рассмотрены литературные данные, связанные с процессами солеотложения в трубах с дискретной шероховатостью. Установлено, что закрутка потока позволяет значительно интенсифицировать теплообмен и уменьшить за счет этого солеотложения на внутренних поверхностях. С течением времени термическое сопротивление солеотложений внутри таких труб асимптотически приближается к своему постоянному

значению, кроме того, интенсификация теплообмена в трубах позволяет уменьшить минеральные отложения на внутренней поверхности примерно в пять раз по сравнению с гладкими круглыми трубами.

В работе предложен метод инженерного расчета конических змеевиковых теплообменных аппаратов типа «труба в трубе», проведено сравнение эффективности таких аппаратов с известными теплообменниками с прямыми трубами и цилиндрическими змеевиками.

С целью оптимизации геометрии проточной части змеевиковых теплообменников, интенсификации теплообмена, снижения массы и габаритов аппарата рекомендуют внешний контур таких аппаратов выполнять по криволинейному закону, в том числе по параболической или гиперболической кривой.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

G – массовый расход жидкости, кг/с;
 M – масса, кг;
 P – давление, Па;
 Q – количество тепла, Вт;
 D – диаметр змеевика, м;
 F – площадь поверхности теплообмена, м²;
 T, t – температура, К;
 d_{eq} – эквивалентный диаметр, м;
 l – длина трубы, м;
 δ – толщина стенки трубы, м;
 u_0 – начальная скорость на входе в канал, м/с;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 ρ – плотность, кг/м³;
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м К);
 c_p – удельная теплоемкость, Дж/(кг К);
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² К);
 k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м² К);
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 Δ – оператор Лапласа;
 ∇ – оператор градиента.

Индексы

zm – змеевиковый;
 pr – прямой, прямолинейный;
 pl – плавление;
 sv – сварка.

Безразмерные комплексы и критерии подобия

Re – критерий Рейнольдса;
 Nu – критерий Нуссельта;
 ξ – коэффициент гидравлического сопротивления.

Обозначения, встречающиеся однократно или в пределах одной главы, поясняются в тексте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Грузинов Е.В. Монтаж технологического оборудования химических заводов / Е.В. Грузинов, Б.А. Рябиков, Т.М. Толчив. – М.: Госстройиздат, 1963. – 232 с.
2. Стабников В.Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В.Н. Стабников, В.Д. Попов, Ф.А. Редько. – М.: Госгортехиздат, 1959. – 583 с.
3. Рамм В.М. Теплообменные аппараты / В.М. Рамм. – М., Л.: Госхимиздат, 1948. – 112 с.
4. Гортышов Ю.Ф. Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования / Ю.Ф. Гортышов. – Казань: Изд-во КГТУ, 2009. – 530 с.
5. Исаев С.Е. Обзор конструктивных особенностей теплообменного оборудования для промышленности / С.Е. Исаев, О.Г. Сорокин, А.Н. Назин // Главный энергетик. – 2008. – № 6. – С. 38–41.
6. Сварка в машиностроении. Справочник: в 4 т. Т. 2 / под ред. А.И. Акулова. – М.: Машиностроение, 1978. – 504 с.
7. Технология тяжелого машиностроения / С.И. Самойлов [и др.]; под ред. С.И. Самойлова. – 2-е изд., перераб. – М.: Машиностроение, 1967. – 595 с.
8. Банников Е.А. Сварка. – М.: АСТ, 2014. – 256 с.
9. Сварка и резка в промышленном строительстве. Справочник: в 2 т. / Б.Д. Малышев [и др.]; под ред. Б.Д. Малышева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1989. – 590 с.
10. Технология и оборудование сварки плавлением: учеб. для вузов / Г.Д. Никифоров [и др.]; под ред. Г.Д. Никифорова. – М.: Машиностроение, 1978. – 327 с.

11. 50 лет создания лазера [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lebedev.ru/ru/history/laser50.html>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 16.10.2015).

12. Лазерные технологии машиностроения / А.М. Забелин [и др.]; под ред. А.М. Забелина. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 2004. – 142 с.

13. Технологические процессы лазерной обработки: учеб. пособие для вузов / А.Г. Григорьянц [и др.]; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 663 с.

14. Патон Б.Е. Современные направления исследований и разработок в области сварки и прочности конструкций / Б.Е. Патон // Автоматическая сварка. – 2003. – № 10/11. – С. 7–13.

15. Гибридные технологии лазерной сварки: учебное пособие / А.Г. Григорьянц [и др.]; под ред. А.Г. Григорьянца. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 83 с.

16. Багоутдинова А.Г. Геометрическое моделирование сложных поверхностей пружинно-витых каналов теплообменных устройств / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, С.А. Мустакимова // Известия КГАСУ. – 2011. – № 4(18). – С. 185–193.

17. ВН 39-1.9-004-98. Ведомственные нормы. Инструкция по проведению гидравлических испытаний трубопроводов повышенным давлением (методом стресс-теста).

18. Крутова И.А. История становления и развития сварочного производства в России / И.А. Крутова, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, С.А. Мустакимова // Деп. рукопись, 2015. – № 202. – В2015. – 103 с.

19. Сварка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/Сварка>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 14.10.2015).

20. Томас К.И. Технология сварочного производства: учебное пособие / К.И. Томас, Д.П. Ильященко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 247 с.
21. Рихман Г.В. Труды по физике. – М.: Изд-во АН СССР, 1956. – 711 с.
22. Сварка в СССР. Развитие сварочной технологии и науки о сварке. Т. 1: Технологические процессы, сварочные материалы и оборудование вузов / Ю.А. Анисимов [и др.]; под ред. Ю.А. Анисимова. – М.: Наука, 1981. – 536 с.
23. Сварка. Введение в специальность: учеб. пособие / В.В. Пешков [и др.]; под ред. В.В. Пешкова. – Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2002. – 213 с.
24. История развития сварки и сварочных технологий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://oitsp.ru/welding_article/istoriya-razvitiya-svarki-i-svarochnyh-tehnologiy. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 14.10.2015).
25. Патон Б.Е. Огонь сшивает металл / Б.Е. Патон, А.Н. Корниенко. – М.: Педагогика, 1988. – 144 с.
26. Азимов А.Н. Краткая история химии. Развитие идей и представлений в химии / А.Н. Азимов. – М.: Мир, 1983. – 187 с.
27. Фарадей Майкл. Биография [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.diagram.com.ua/info/phys/7.shtml>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 14.10.2015).
28. Партала О.Н. Майкл Фарадей (К 170-летию электромагнетизма) / О.Н. Партала // Электрик. – Киев: Радиоаматор, 2000. – 4(4). – С. 60.
29. Истомин С.В. Самые знаменитые изобретатели России / С.В. Истомин. – М.: Вече, 2000. – 469 с.
30. Томас К.И. История сварочной техники и технологий: учебное пособие / К.И. Томас. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 213 с.

31. Никитин В.П. Русское изобретение – электрическая дуговая сварка / В.П. Никитин. – М.: АН СССР, 1952. – 135 с.
32. Шалимов М.П. Сварка вчера, сегодня, завтра / М.П. Шалимов, В.И. Панов; под ред. В.В. Запарий. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ-УПИ, 2006. – 227 с.
33. История техники / А.А. Зворыкин [и др.]; под ред. Ю.К. Милонова. – М.: Соцэкгиз, 1962. – 576 с.
34. Глизманенко Д.Л. Газовая сварка и резка металлов / Д.Л. Глизманенко. – изд. 5-е, перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1969. – 304 с.
35. Сварка в машиностроении. Справочник: в 4 т. / Г.А. Николаев [и др.]; под ред Г.А. Николаева. – М.: Машиностроение, 1978.
36. Лихачев В.Л. Электросварка. Справочник / В.Л. Лихачев. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2010. – 672 с.
37. Овчинников В.В. Оборудование, техника и технология сварки и резки металлов: учебник / В.В. Овчинников. – М.: КНОРУС, 2013. – 302 с.
38. Левахин П.А. Газовые смеси. История развития / П.А. Левахин // Все для сварки. – 2010. – № 3. – С. 15.
39. История развития. Газоэлектрическая сварка [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.autowelding.ru/publ/1/1/1/9-1-0-60>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 14.10.2015).
40. Васильев В.И. Введение в основы сварки: учебное пособие / В.И. Васильев, Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 317 с.
41. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя. Т. 3 / В.И. Анурьев; под ред. И.Н. Жестковой. – 8-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2001. – 864 с.

42. Полуавтоматическая сварка – MIG/MAG [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.goodwill-ru.com>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 16.10.2015).

43. Пимонов М.В. Технологии и оборудование дуговой сварки и резки: учеб.пособие / М.В. Пимонов, Н.В. Абабков. – Кемерово: КузГТУ, 2011. – 186 с.

44. Неровный В.М. Плазменная сварка: учебное пособие / В.М. Неровный. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 12 с.

45. Саломатова Е.С. Электронно-лучевая сварка – от изобретения до наших дней / Е.С. Саломатова // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – Пермь, 2013. – Т 15(1). – С. 57–62.

46. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 783 с.

47. Теплотехника / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 3-е изд., испр. – М.: Высшая школа, 2002. – 671 с.

48. Теплообменные аппараты: учебное пособие / Б.Е. Байгалиев [и др.]. – Казань: Изд-во КГТУ, 2012. – 180 с.

49. Разуваев А.В. Материалы, применяемые в технологических теплообменных аппаратах / А.В. Разуваев, Е.А. Разуваева. – Саратов: СГТУ, 2010. – 15 с.

50. Материалы для производства теплообменников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ural-mep.ru/teoriya-proizvodstva-teploobmennikov>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 16.10.2015).

51. Конструкционные материалы. Справочник / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.

52. Сварка аустенитных сталей. Основные свойства и классификация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.svarkainfo.ru/lib/teh3>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 10.10.2015).

53. Вершинский С.В. Проектирование сварных конструкций в машиностроении / С.В. Вершинский [и др.]; под ред. С.А. Куркина. – М.: Машиностроение, 1975. – 376 с.

54. Вопросы проектирования, изготовления, монтажа и пуска в эксплуатацию теплообменных аппаратов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://openedu.urfu.ru/files/book/209.html>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 12.10.2015).

55. Жегалина Т.Н. Сварщик. Технология выполнения ручной сварки: практические основы профессиональной деятельности / Т.Н. Жегалина. – М.: Академкнига, 2006. – 126 с.

56. Общепринятая система обозначения методов сварки плавлением [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intertehno.ru/articles/c2/1/>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 15.10.2015).

57. Барон Ю.М. Технология конструкционных материалов / Ю.М. Барон. – СПб.: Питер, 2012. – 512 с.

58. Лупачев В.Г. Ручная дуговая сварка: учебник / В.Г. Лупачев. – М.: Высшая школа, 2006. – 416 с.

59. Васильев В.И. Введение в основы сварки: учебное пособие / В.И. Васильев, Д.П. Ильященко, Н.В. Павлов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 338 с.

60. Фоминых В.П. Ручная дуговая сварка / В.П. Фоминых, А.П. Яковлев. – М.: Высшая школа, 1986. – 281 с.

61. Сергеев Н.П. Справочник молодого электросварщика / Н.П. Сергеев. – М.: Высшая школа, 1975. – 188 с.

62. Малышев Б.Д. Ручная дуговая сварка / Б.Д. Малышев, В.И. Мельник, И.Г. Гетия. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.

63. Клинов И.Я. Химическое оборудование в коррозионностойком исполнении / И.Я. Клинов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1970. – 589 с.
64. Покрытые электроды (SMAW) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.esab.ru/ru/ru/products/>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 15.10.2015).
65. Виноградов В. М. Основы сварочного производства / В.М. Виноградов, А.А. Черепяхин, Н.Ф. Шпунькин. – М.: Академия, 2007. – 298 с.
66. Акулов А.И. Сущность и техника различных способов сварки плавлением / А.И. Акулов. – М.: МГИУ, 2006. – 104 с.
67. Патон Б.Е. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением / Б.Е. Патон. – М.: Машиностроение, 1974. – 768 с.
68. Юхин Н.А. Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах (MIG/MAG) / Н.А. Юхин. – М.: СОУЭЛО, 2002. – 72 с.
69. Райский В. Газовые смесители [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intertehno.ru/articles/c5/14>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 16.10.2015).
70. Кононенко В.Я. Сварка в среде защитных газов плавящимся и неплавящимся электродом / В.Я. Кононенко. – Киев: Ника-Принт, 2007. – 266 с.
71. Сварка плавящимся электродом в среде защитного газа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://penzaelektrod.ru/articles/art31.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 16.10.2015).
72. Милютин В.С. Источники питания для сварки / В.С. Милютин, М.П. Шалимов, С.М. Шанчуров. – М.: Айрис-пресс, 2007. – 319 с.
73. Грохольский Н.Ф. Восстановление деталей машин и механизмов сваркой и наплавкой / Н.Ф. Грохольский. – М.: Машиностроение, 1962. – 276 с.

74. Рыбаков В.М. Дуговая и газовая сварка / В.М. Рыбаков. – М.: Высшая школа, 1986. – 208 с.
75. Фрумин И.И. Сварка порошковой проволокой / И.И. Фрумин. – Киев, 1972. – 215 с.
76. Сварка в защитном газе неплавящимся электродом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://penzaelektrod.ru/articles/art34.htm>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 16.10.2015).
77. Галактионов А.Т. Справочник рабочего-сварщика / А.Т. Галактионов [и др.]; под ред. В.В. Степанова. – М.: Свердловск: Машгиз, 1961. – 640 с.
78. Бельфор М.Г. Оборудование для дуговой и шлаковой сварки и наплавки / М.Г. Бельфор, В.Е. Патон. – М.: Высшая школа, 1974. – 338 с.
79. Фролов В.В. Теория сварочных процессов / В.В. Фролов. – М.: Высшая школа, 1988. – 210 с.
80. Ерохин А.А. Основы сварки плавлением / А.А. Ерохин. – М.: Машиностроение, 1973. – 447 с.
81. Чернышов Г.Г. Технология электрической сварки плавлением: учебник / Г.Г. Чернышов. – 2-е изд., перераб. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 496 с.
82. Технология роботизированной TIG-сварки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alfarobot.ru/articles/дуговая-TIG-сварка/>. – Загл. с экрана. – (Дата обращения: 13.10.2015).
83. Мальков С. Современные сварочные инверторы / С. Мальков // Силовая электроника. – 2011. – № 2. – С. 76–77.
84. Игнатов А.Г. Лазерная сварка сталей мощными CO₂-лазерами А.Г. Игнатов // Фотоника. – М.: Техносфера, 2008. – № 6. – С. 10–17.

85. Григорьянц А.Г. Лазерная техника и технология. Лазерная сварка металлов: учеб. пособие для вузов. Т. 5 / А.Г. Григорьянц. – М.: Высшая школа, 1988. – 207 с.

86. Алешин Н.П. Сварка. Резка. Контроль. Справочник. Т. 1 / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов. – М.: Машиностроение, 2004. – 480 с.

87. Григорьянц А.Г. Пространственная структура излучения мощных волноводных и волоконных лазеров для технологий / А.Г. Григорьянц В.В. Васильцов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. – № 4. – С. 5–33.

88. Патент РФ № 127438 на полезную модель МПК F28D7/10. Кожухотрубчатый теплообменник / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, С.А. Мустакимова. – № 2012129094/06, заявл. 10.07.12; опубл. 27.04.13; Бюл. 12.

89. Патент РФ № 133596 на полезную модель МПК F28D7/10. Змеевиковый теплообменник / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, И.А. Князева, А.Г. Багоутдинова. – № 2013113048/06, заявл. 22.03.13; опубл. 20.10.13; Бюл. 29.

90. Багоутдинова А.Г. Энергоэффективные теплообменные аппараты на базе пружинно-витых каналов и труб типа «конфузор-диффузор» / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов // Деп. рукопись, 2013. – № 353. – В2013. – 105 с.

91. Багоутдинова А.Г. Теплообменные аппараты типа «труба в трубе» с внутренним змеевиковым пружинно-витым каналом / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, И.А. Князева // Известия КГАСУ. – 2013. – № 1(23). – С. 120–124.

92. Пантелеева Л.Р. Высокоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых труб. Тезисы доклада Международной юбилейной научно-практической конференции

«Передовые технологии и перспективы развития ОАО «Казаньоргсинтез» / Л.Р. Пантелеева, А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов. – Казань, 2008. – С. 138–139.

93. Багоутдинова А.Г. Высокоэффективные аппараты теплообмена на базе пружинно-витых каналов. Тезисы XIII Международного симпозиума «Энергоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан» / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов. – Казань, 2012. – С. 198–202.

94. Евсеев Е.С. Высокоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых труб / Е.С. Евсеев, А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов // Труды Академэнерго. – 2008. – № 4. – С. 18–33.

95. Багоутдинова А.Г. Высокоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых каналов / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, С.А. Мустакимова // Известия КГАСУ. – 2012. – № 3 (21). – С. 86–95.

96. Патент РФ № 126813 на полезную модель МПК F28D7/00. Змеевиковый теплообменный элемент / А. Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, В.Н. Гуков, Н.М. Шарипов. – №2012148492/06, заявл. 14.11.12; опубл. 10.04.13; Бюл. 10.

97. Басова О.А. Змеевиковый теплообменник на базе пружинно-витых каналов / О.А. Басова, Я.Д. Золотоносов // Сборник научных трудов КазГАСУ. – 2009. – С. 33–35.

98. Князева И.А. Змеевиковый теплообменник и способ его изготовления. Тезисы доклада 66 Всероссийской научной конференции по проблемам архитектуры и строительства / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов. – Казань: КГАСУ, 2014. – 173 с.

99. Чирков А.М. Специальные методы соединения материалов: метод. указ. / А.М. Чирков. – Киров: ВятГУ, 2009. – 76 с.

100. Чирков А.М. Применение лазерной сварки для производства кожухотрубчатых теплообменных аппаратов нового поколения на базе пружинно-витых каналов / А.М. Чирков [и др.] // Известия КГАСУ. – 2011. – № 3 (21). – С. 120–126.

101. Князева И.А. Технология изготовления современных змеевиковых теплообменных аппаратов. Тезисы доклада Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию Нижнекамского химико-технологического института «Проблемы и перспективы развития химии, нефтехимии и нефтепереработки» / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов. – Нижнекамск: НХТИ, 2014. – Т. 1. – С. 18–40.

102. Патент РФ № 150006 на полезную модель. Установка для лазерной сварки витой трубы с пружинно-витым каналом / Я.Д. Золотоносов, И.А. Князева. – № 2014123281, заявл. 06.06.14; опубл. 27.01.15; Бюл. 3.

103. Князева И.А. Выбор математической модели для описания теплового процесса лазерной сварки пружинно-витых каналов / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова // Известия КГАСУ. – 2013. – № 3(25). – С. 67–72.

104. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке / Н.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.

105. Негода Е.Н. Тепловые процессы при сварке: учеб. пособие / Е.Н. Негода. – Владивосток: ДВГТУ, 2008. – 125 с.

106. Язовских В.М. Математическое моделирование и инженерные методы расчета в сварке: в 2 ч. Ч. 2: Тепловые процессы при сварке и моделирование в пакете Mathcad / В.М. Язовских. – Пермь: ПГТУ, 2008. – 119 с.

107. Петров Г.Л. Теория сварочных процессов (с основами физической химии) / Г.Л. Петров, А.С. Тумаров. – М.: Высшая школа, 1977. – 392 с.

108. Мелюков В.В. Оптимизация режима обработки материалов концентрированными потоками энергии: учебное пособие / В.В. Мелюков. – Киров: ВятГУ, 2003. – 111 с.

109. Князева И.А. Оптимизация мощности лазерного излучения при сварке пружинно-витого канала / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносков // Известия КГАСУ. – 2014. – № 2 (28). – С. 116–120.

110. Золотоносков Я.Д. Разработка и изготовление змеевиковых теплообменных аппаратов на базе пружинно-витых каналов. Тезисы доклада XIV Международного симпозиума «Энергоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан» / Я.Д. Золотоносков, И.А. Князева, А.М. Чирков. – Казань, 2014. – С. 534–537.

111. Золотоносков Я.Д. Технология изготовления и испытания пружинно-витых каналов / Я.Д. Золотоносков, И.А. Князева // Известия КГАСУ. – 2015. – № 2(32). – С. 208–212.

112. Золотоносков Я.Д. Изготовление теплообменных аппаратов нового поколения на базе пружинно-витых каналов Тезисы доклада XV Международного симпозиума «Энергоэффективность и энергосбережение в Республике Татарстан» / Я.Д. Золотоносков, И.А. Князева. – Казань, 2015. – С. 116–118.

113. Князева И.А. Получение пружинно-витых каналов путем лазерной сварки / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносков, В.А. Лисовский // Известия КГАСУ. – 2015. – № 3(33). – С. 103–109.

114. Князева И.А. Изготовление теплообменных элементов на базе пружинно-витых каналов / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносков, В.А. Лисовский // Известия ВУЗов. Строительство. – 2015. – № 8(680). – С. 106–115.

115. Князева И.А. Пневмоиспытание труб и контроль качества сварных швов пружинно-витых каналов, выполненных лазерной сваркой. Тезисы доклада 67 Всероссийской научной конференции по проблемам

архитектуры и строительства / И.А. Князева, А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов. – Казань: КГАСУ, 2015. – 173 с.

116. Багоутдинова А.Г. Конструкции эффективных теплообменных элементов для скоростных теплообменников / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, В.Н. Посохин // Сантехника. Отопление. Кондиционирование. – 2014. – № 7. – С. 72–75.

117. Багоутдинова А.Г. Математическое моделирование винтовых теплообменных элементов теплообменников / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, В.Н. Посохин // Известия вузов. Строительство. – 2014. – № 8. – С. 41–46.

118. Дзюбенко Б.В. Влияние закрутки потока на теплообмен в условиях солеотложения в витых трубах. Труды четвертой Российской национальной конференции по теплообмену «Дисперсные потоки и пористые среды. Интенсификация теплообмена / Б.В. Дзюбенко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – Т. 6. – С. 196–199.

119. Князева И.А. Применение лазерной сварки для производства пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов. Всероссийская научная конференция «Проблемы архитектуры и строительства» / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова. – Казань, 2013. – С. 134.

120. Чирков А.М. Технологические особенности лазерной сварки пружинно-витых каналов теплообменных аппаратов / А.М. Чирков, И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов // Известия КГАСУ. – 2012. – № 4(22). – С. 240–244.

121. Князева И.А. Оптимизация мощности лазерного излучения при сварке пружинно-витого канала / И.А. Князева, Я.Д. Золотоносов // Известия КГАСУ. – 2014. – № 2(28). – С. 116–120.

122. Патент РФ № 2542865 на изобретение. Способ изготовления витых труб типа «конфузор-диффузор» / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золо-

тоносов, Н.М. Шарипов, Д.З. Миннигареев, А.А. Матюшко., А.Г. Багоутдинова, М.Н. Яхнев. – № 2013116659/02; заявл. 11.04.2013; опубл. 27.02.2015.

123. Багоутдинова А.Г. Змеевиковые теплообменники и их математическое описание / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов // Известия вузов. Строительство. – 2015. – № 7. – С. 44–52.

124. Багоутдинова А.Г. Современные змеевиковые теплообменные аппараты типа «труба в трубе». Материалы IX семинара Вузов по теплофизике и энергетике / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, И.А. Князева. – Казань: КГЭУ, 2015. – Т. 2. – С. 3–13.

125. Патент РФ № 155676 на полезную модель МПК F28D7/10. Змеевиковый теплообменник / Я.Д. Золотоносов, А.Я. Золотоносов, И.А. Князева. – № 2015104828/06, заявл. 12.02.15; опубл. 20.10.15; Бюл. 29.

126. Патент РФ № 160291 на полезную модель МПК F28D7/00. Змеевиковый теплообменник / Я.Д. Золотоносов, А.Я. Золотоносов, И.А. Князева, И.И. Осыка, К.С. Галимов. – № 2015115371; заявл. 23.04.15; опубл. 10.12.15; Бюл. 30.

127. Аронов И.З. О движении жидкости в изогнутых трубах-змеевиках / И.З. Аронов // Изв. высших учебных заведений. Энергетика. – 1961. – № 3. – С. 66–74.

128. Щукин В.К. Режимы течения жидкости в трубах с ленточными завихрителями / В.К. Щукин // Труды КАИ. – 1968. – Вып. 98. – С. 15–20.

129. Фастовский В.Г. Исследование теплопередачи в спиральном канале / В.Г. Фастовский, А.Е. Ровинский // Теплоэнергетика. – 1957. – № 4. – С. 39–41.

130. Щукин В. К. Обобщение опытных данных по теплоотдаче в змеевиках / В.К. Щукин // Теплоэнергетика. – 1969. – № 2. – С. 50–53.

131. Щукин В.К. Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. – М.: Машиностроение, 1970. – 331 с.
132. Eustice. J. Proc. Rog. Soc / J. Eustice. – A., 1910. – Vol. 84.
133. Милович А.Я. Бюллетень политехнического общества / А.Я. Милович. – 1914. – № 10. – 26 с.
134. Dean W.R. Philos.Mag / W.R. Dean. – 1927. – Vol. 4. – P. 208–223.
135. White C.M. Streamline Flow through Curved Pipes. Proc. Roy / C. M. White. – Soc. (London): A/, 1929. – Vol. 123. – P. 645–663.
136. Taylor G.J. The Criterion for Turbulence in curved Pipes. Proc. Roy / G. J. Taylor. – Soc. (London): A., 1929 – Vol. 24.
137. Adler M. Zeitschrift fur Ahd; Math And Hefts / M. Adler. – Band. 14. – 1934.
138. Вальтер П.А. Движение вязкой жидкости в искривленном патрубке. Труды гидроэнергетического исследовательского института / П.А. Вальтер. – М., Л.: ОНТИ НКТП, 1935. – Вып. 5.
139. Вальтер П.А. Исследование движения вязкой жидкости в трубе, изогнутой по витой линии. Труды ЦАГИ / П.А. Вальтер. – 1937. – Вып. 323.
140. Keulagan C.H. J. of the National Bureau of Standards / C.H. Keulagan, K. H. Beij. – 1937. – № 1. – Vol. 18.
141. Аронов И.З. Теплообмен и гидравлическое сопротивление в изогнутых трубах: дис... канд. техн. наук / И.З. Аронов. – Киев, 1950. – 130 с.
142. Аронов И.З. О теплообмене при движении жидкости в винтовых змеевиках / И.З. Аронов // Теплоэнергетика. – 1961. – № 6. – С. 75–77.
143. Михеев М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1949. – 396 с.

144. Дементьева К.В. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в криволинейных каналах щелевого сечения / К.В. Дементьева, И.И. Телегина // Теплоэнергетика. – 1979. – № 1. – С. 51–54.

145. Щукин В.К. Дополнительные условия подобия потоков в поле массовых инерционных сил / В.К. Щукин // Труды КАИ. – 1963. – Вып. 76. – С. 40–45.

146. Аронов И.З. О повышении критического числа Рейнольдса при движении жидкости в изогнутых трубах / И.З. Аронов // ИВУЗ «Энергетика». – 1960. – № 4. – С. 30–37.

147. Сухов Е.В. Совершенствование конструкций и метода расчета компактных спирально-змеевиковых узлов охлаждения компрессорных агрегатов: автореф. дис... на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / Е.В. Сухов. – Омск, 2012. – 17 с.

148. Справочник по теплообменным аппаратам / П.И. Бажан [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 366 с.

149. Патент РФ № 96227 на полезную модель МПК F28D7/00. Теплообменник / Р.К. Денисов, С.П. Евтеева, И.И. Зайченко. – № 201012111/22; заявл. 29.03.10; опубл. 20.07.10; Бюл. 20.

150. Патент РФ № 137749 на полезную модель МПК F28D7/00. Теплообменный элемент / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, Т.В. Белавина. – № 2013144123/02; заявл. 01.10.13; опубл. 27.02.14; Бюл. 6.

151. Патент РФ № 139566 на полезную модель МПК F28D7/00. Теплообменный элемент / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, С.А. Мустакимова, А.Г. Багоутдинова, М.Н. Яхнев. – № 201335072/06; заявл. 25.07.13; опубл. 20.04.14; Бюл. 11.

152. Патент РФ № 140683 на полезную модель МПК F28D7/00. Теплообменный элемент / А.Я. Золотоносов, А.М. Тартыгашева. – № 201354131/06; заявл. 05.12.13; опубл. 05.12.13; Бюл. 14.

153. Багоутдинова А.Г. Технология изготовления труб типа «конфузор-диффузор» с винтовой поверхностью теплообмена. Материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию Нижнекамского химико-технологического института «Актуальные инженерные проблемы химических и нефтехимических производств» / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, М.Н. Яхнев. – Нижнекамск: НХТИ (филиал), 2013. – С. 151–154.

154. Золотоносов Я.Д. Технология изготовления витых труб методами ротационнойковки и лазерной сварки. Труды XIV Международного симпозиума «Энергоэффективность и энергосбережение Республики Татарстан» / Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, А.М. Тартыгашева. – Казань, 2014. – С. 534–537.

155. Патент РФ № 119452 на полезную модель МПК F28D7/00. Теплообменный элемент / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, А.Г. Багоутдинова, И.И. Осыка. – № 2012109355/06; заявл. 12.03.12; опубл. 20.08.12; Бюл. 23.

156. Басова О.А., Золотоносов Я.Д. Змеевиковый теплообменник на базе пружинно-витых каналов / О.А. Басова, Я.Д. Золотоносов // Сборник научных трудов КазГАСУ. – Казань, 2009. – С. 33–35.

157. Багоутдинова А.Г. Высокоэффективные теплообменные аппараты на базе теплообменных элементов в виде пружинно-витых каналов / А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, С.А. Мустакимова // Известия КГАСУ. – 2012. – № 3(21). – С. 86–95.

158. Багоутдинова А.Г. Геометрическое моделирование сложных поверхностей пружинно-витых каналов теплообменных устройств /

А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, С.А. Мустакимова // Известия КГАСУ. – 2011. – № 4(18). – С. 185–193.

159. Патент РФ № 2102673 на изобретение МПК F28D7/00. Кожухотрубный змеевиковый теплообменник / А.В. Сударев, Б.В. Сударев, В.Б. Сударев, А.А. Кондратьев, В.В. Кондратьев, М.В. Лазарев. – № 96106922/06; заявл. 09.04.96; опубл. 20.01.98.

160. Патент РФ № 2036406 на изобретение МПК F28D7/00. Кожухотрубный змеевиковый теплообменник / А.В. Сударев, Б.В. Сударев, В.Б. Сударев, А.А. Кондратьев, А.Н. Цуриков. – № 93009729/06; заявл. 24.02.93; опубл. 27.05.95.

161. Патент РФ № 2115876 на изобретение МПК F28D 7/00. Теплообменник типа «труба в трубе» / А.Л. Коптелов. – № 96101976/06; заявл. 01.02.96; опубл. 20.07.98.

162. Павлов К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков. – 13-е изд., стереотип. – М.: Изд-во «Альянс», 2006. – 576 с.

163. Леонтьев А.И. Теплофизика и теплотехника перспективных интенсификаторов теплообмена (обзор) / А.И. Леонтьев, В.В. Олимпиев // Известия академии наук. Энергетика. – 2011. – № 1. – С. 7–35.

164. Fisher P. Fouling measurement techniques. – Chemical. Engineering. Progress / P. Fisher. – 1975. – Vol. 71. – № 7. – P. 66–72.

165. Hasson D., Avriel M. Calcium carbonate scale deposition of heat transfer surfaces, Desalination / D. Hasson, M. Avriel. – 1968. – Vol 5. – №1. – P. 107–119.

166. Hasson D., Zahavi I. Mechanism of calcium sulfate scale deposition on heat-transfer surfaces. – Industr. Engng. Chem / D. Hasson, I. Zahavi. – 1970. – Vol 9. – P. 1–10.

167. Коваленко Л.М. Теплообменники с интенсификацией теплоотдачи / Л.М. Коваленко, А.Ф. Глушков. – М: Энергоатомиздат, 1986. – 240 с.

168. Дрейцер Г.А. Исследование солеотложений при течении воды с повышенной карбонатной жесткостью в каналах с дискретными турбулизаторами / Г.А. Дрейцер // Теплоэнергетика. – 1996. – № 3. – С. 30–35.

169. Дзюбенко Б.В. Теплообмен в условиях солеотложений в каналах с турбулизаторами потока. Труды XVI школы – семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» / Б.В. Дзюбенко, А.С. Мякочин. – СПб., М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 529–532.

170. Муравьев А.В. Влияние геометрических турбулизаторов на образование отложений в ТОА. XVI Школа – семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергоустановках / А.В. Муравьев, Н.В. Мозговой, И.Г. Дроздов. – СПб.: Издательский дом МЭИ, 2007. – Т. 2. – С. 428–430.

171. Маграквелидзе Т.Ш. Некоторые особенности образования отложений на шероховатых поверхностях. VI Минский Международный форум по теплообмену / Т.Ш. Маграквелидзе, Н.Н. Леквеншвили, Н.О. Банцадзе, П.Н. Микашавадзе, Х.Н. Ломидзе. – Минск, 2008. – С. 41–46.

172. Лыгин П.А. Новая конструкция кожухотрубных водо-водяных теплообменников / П.А. Лыгин // Новости теплоснабжения. – 2004. – № 11. – С. 50–53.

173. Pinheiro J.D. Fouling of heat transfer surfaces // in Heat Exchangers Thermal-Hydraulic Fmdamentalsand Design, eds.: Kakas. A.E. Berglesand F. Meinger, Mc Graw-Hill, New York, 1981. – P. 1013–1015.

174. Дрейцер Г.А. Сравнительные исследования величины отложений в трубах с кольцевыми турбулизаторами и в гладких трубах кожухотрубчатых теплообменников / Г.А. Дрейцер, В.И. Гомон, И.З. Аронов // Промышленная теплотехника. – 1983. – № 2. – С. 36–42.

175. Кавкаев Д.Д. Усовершенствование теплообменников для тепло-снабжения. Материалы четвертой Российской национальной конференции по теплообмену. Молодежнаясекция / Д.Д. Кавкаев, Ю.А. Кузьма-Кичта, А.Ф. Лисовый. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – Т. 8. – С. 69–72.

176. Патент РФ №161810 на полезную модель МПКF28D7/00. Змеевиковый теплообменник / А.Я. Золотоносов, Я.Д. Золотоносов, И.А. Князева, А.Г. Багоутдинова, Е.К. Вачагина. – №20151127573; заявл. 08.07.15; опубл. 20.01.16; Бюл. 2.

177. Корн Г. Справочник по математике для научных работников / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 831 с.

178. Багоутдинова А.Г. Математическая модель течения вязкой жидкости в радиально вращающемся канале сложной конфигурации / А.Г. Багоутдинова // Известия вузов. Проблемы энергетики. – Казань: Изд-во КГЭУ. – 2003. – № 1(12). – С. 181–186.

179. M. Germano. The Dean equations extended to helical hihe flow. J . Fluid Mech, 1989. – Vol. 203. – P. 289–305.

180. Menter F.R. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows, AIAA-Paper 1993.

181. Menter F.R., Kuntz M., and Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Turbulence, Heat and Mass

Transfer 4, ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, and M. Tummers. – Begell House, Inc., 2003. – P. 625–632.

182. Краснощеков Е.А. Задачник по теплопередаче / Е.А. Краснощеков, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1980. – 287 с.

183. Jeschke H. Wärmeübergang und Druckverlust in Rohrschlänger. – Beihelt «Technische Mechanik» zu Z. VDI, Bd. – 69. – P. 24–28.

184. Woschni G. Untersuchung des Wärmeübergangung des Druckverlust in gekrummten Rohren. Diss. – Dresden, 1959.

185. Srinivasan P.S., Nandapurkar S.S., Holland F.A. Pressure Drop and Heat Transfer in Coils. – Trans. Instn. Chem. Engrs, 1968. – V. 218. – P. 113–119.

186. Махди Я.Ю. Моделирование конвективного теплообмена в криволинейных каналах с кольцевыми турбулизаторами / Я.Ю. Махди, Д.П. Шматов, И.Г. Дроздов, А.В. Бараков // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2012. – Т. 8. – № 5. – С. 88–91.

187. Вачагина Е.К. Сопряженная задача теплообмена при течении жидкостей в змеевиках с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали / Вачагина Е.К., Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., Князева И.А. // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – № 16. – С. 234–238.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ПРОГРАММА ДЛЯ РАСЧЕТА ВОДО-ВОДЯНОГО КОНИЧЕСКОГО ЗМЕЕВИКОВОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ»

format short g

t=[0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100]; % температура

Pr=[13.67 9.52 7.02 5.42 4.31 3.54 2.98 2.55 2.21 1.95 1.75];

ro=[999.9 999.7 998.2 995.7 992.2 988.1 983.2 977.8 971.8 965.3 958.4];

Cp=[4.212 4.191 4.183 4.174 4.174 4.174 4.179 4.187 4.195 4.208 4.22];

lambda=[0.551 0.574 0.599 0.618 0.635 0.648 0.659 0.668 0.674 0.68 0.683];

v=[1.789 1.306 1.006 0.805 0.659 0.556 0.478 0.415 0.365 0.326 0.295];

lambda_c=45; % Коэффициент теплопроводности стальных труб

G1=2130; % Расход греющей воды

G2=3200; % Расход нагреваемой воды

D1=0.3 % Диаметр змеевика

d1=0.032; % Внутренний диаметр внутренней трубы

D=0.048; % Внутренний диаметр внешней трубы

delta=0.003; % Толщина стенки внутренней трубы

d2=d1+delta; % Внешний диаметр внутренней трубы

% Эквивалентный диаметр для кольцевого канала

d_eqv=D-d1-delta;

t_1_g1=95; % Температура на входе греющей воды

t_1_g2=15; % Температура на входе нагреваемой воды

t_2_g2=45; % Температура на выходе нагреваемой воды

h=4*d2; % Расстояние между витками

ugol=pi/24; % Угол конуса

T=t_2_g2; T0=t_1_g2;

step=10; % шаг по температуре

F0=0; l0=0; k0=0; a1=0; a2=0;

```

D_zm=D1; % верхний диаметр конуса
while T>T0
fi1=1+3.54*d1/D_zm % поправочный коэффициент для внутренней трубы
fi2=1+3.54*D/D_zm % поправочный коэффициент для внешней трубы
t_1_g2=T-step; t_2_g2=T;
% Количество передаваемой теплоты
Q=G2*spline(t,Cp,t_1_g2)*(t_2_g2-t_1_g2)/3600
% Температура на выходе греющей воды
t_2_g1=t_1_g1-Q*3600/(G1*spline(t,Cp,t_1_g2))
% Среднеарифметические значения температур и физич. свойства воды
t_g1=0.5*(t_1_g1+t_2_g1); Pr_g1=spline(t,Pr,t_g1);
lambda_g1=spline(t,lambda,t_g1); t_g2=0.5*(t_1_g2+t_2_g2);
Pr_g2=spline(t,Pr,t_g2); lambda_g2=spline(t,lambda,t_g2);
po1=spline(t,ro,t_1_g1); po2=spline(t,ro,t_1_g2);
nju1=spline(t,v,t_g1); nju2=spline(t,v,t_g2);
% Скорость движения теплоносителей
w1=4*G1/(spline(t,ro,t_1_g1)*pi*d1^2*3600);
w2=4*G2/(spline(t,ro,t_1_g2)*pi*(D^2-d2^2)*3600);
% Число Рейнольдса для потока греющей воды
Re_g1=w1*d1*10^6/spline(t,v,t_g1);
for i=1:1:2 % Температура стенки
t_ct1=0.5*(t_g1+t_g2); Pr_ct1=spline(t,Pr,t_ct1);
% Число Нуссельта
Nu_g1=0.021*Re_g1^0.8*Pr_g1^0.43*(Pr_g1/Pr_ct1)^0.25;
% Коэффициент теплоотдачи от греющей воды к стенке трубы
alfa1=fi1*Nu_g1*lambda_g1/d1;
% Число Рейнольдса для потока нагреваемой воды
Re_g2=w2*d_eqv*10^6/spline(t,v,t_g2)

```

```

t_ct2=t_ct1                                % Температура стенки
Pr_ct2=spline(t,Pr,t_ct2)
% Число Нуссельта
Nu_g2=0.017*Re_g2^0.8*Pr_g2^0.4*(Pr_g2/Pr_ct2)^0.25*(D/d2)^0.18
% Коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой воде
alfa2=fi2*Nu_g2*lambda_g2/d_eqv
% Коэффициент теплопередачи
k=1/(1/alfa1+0.0015/lambda_c+1/alfa2)
delta_t=t_g1-t_g2
q=k*delta_t                                % плотность теплового потока
F=Q*1000/q                                  % площадь поверхности нагрева
t_ct1=t_g1-q/alfa1                          % уточняем температуру стенки
t_ct2=t_g2+q/alfa2
Pr_ct1=spline(t,Pr,t_ct1)
Pr_ct2=spline(t,Pr,t_ct2)  end
l_vitok=sqrt((pi*D_zm)^2+h^2)                % длина одного витка
l=F/(pi*d1)                                  % длина внутренней трубы
n=l/l_vitok                                  % число витков
y=n*h; D_zm=D_zm+2*y*tan(ugol);
T=T-step; t_1_g1=t_2_g1;
F0=F0+F; l0=l0+l; k0=k0+k*F; a1=a1+alfa1*F a2=a2+alfa2*F
end
disp(sprintf (' диаметр змеевика=%g коэффициент теплопередачи=%g',
D_zm, k0/F0))
disp(sprintf (' альфа1=%g альфа2=%g', a1/F0, a2/F0))
disp(sprintf (' длина змеевика=%g площадь теплообмена=%g ', l0,F0))
disp(sprintf (' высота змеевика=%g количество витков=%g', h*l0/l_vitok,
l0/l_vitok))

```

Оглавление

Введение.....	3
Глава первая. ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ...	5
1.1. Сварка в древности и средние века.....	5
1.2. Развитие сварки за период XIX и начала XX веков.....	19
1.3. Становление и развитие сварочного производства в СССР.....	23
1.4. Перспективы развития способов сварки.....	41
Глава вторая. ПРИМЕНЕНИЕ СВАРКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....	48
2.1. Общие положения.....	48
2.2. Характеристика теплообменного оборудования.....	50
2.3. Применяемые способы сварки для производства теплообменных аппаратов.....	54
2.3.1. Ручная дуговая сварка.....	55
2.3.2. Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом в среде защитного газа.....	61
2.3.3. Полуавтоматическая сварка порошковой проволокой....	67
2.3.4. Ручная дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа.....	70
2.3.5. Лазерная сварка.....	77
Глава третья. СОВРЕМЕННЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С РАЗВИТОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ ТЕПЛООБМЕНА....	89
3.1. Прямолинейные пружинно-витые каналы.....	89
3.2. Змеевиковый пружинно-витой канал.....	95
3.3. Оценка степени развития поверхности.....	96
Глава четвертая. ЗМЕЕВИКОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ.....	101
4.1. Конструкции современных змеевиковых теплообменников.....	101
4.2. Конструкции инновационных змеевиковых теплообменников...	124
4.3. Сопряженная задача теплообмена при течении жидкостей в змеевиках с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали.....	134

Глава пятая. ГЕОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	146
5.1. Общий метод описания поверхностей теплообмена.....	146
5.2. Прямолинейные пружинно-витые каналы.....	148
5.3. Конические пружинно-витые каналы и пружинно-витые каналы типа «конфузор-диффузор».....	153
5.4 Змеевиковый пружинно-витой канал.....	155
Глава шестая. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРУЖИННО-ВИТЫХ КАНАЛОВ.....	157
Глава седьмая. ПРОЦЕССЫ СОЛЕОТЛОЖЕНИЯ В ТРУБАХ С ДИСКРЕТНОЙ ШЕРОХОВАТОСТЬЮ.....	184
Глава восьмая. ПРИМЕР РАСЧЕТА ВОДО-ВОДЯНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ТИПА «ТРУБА В ТРУБЕ».....	194
8.1. Расчет водо-водяного теплообменника типа «труба в трубе» с прямыми трубами.....	194
8.2. Расчет водо-водяного цилиндрического змеевикового теплообменника типа «труба в трубе».....	199
8.3. Расчет водо-водяного змеевикового теплообменника типа «труба в трубе», выполненного на конус.....	202
Заключение.....	217
Основные условные обозначения.....	219
Литература.....	220
Приложение.....	241

Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д.

ЗМЕЕВИКОВЫЕ ТЕПЛООБМЕННИКИ

Моделирование, расчет

Монография

Редактор Л.З. Ханафиева

Издательство

Казанского государственного архитектурно-строительного университета		
Подписано в печать 24.03.16		Формат 60x84/16
Заказ № 85	Печать ризографическая	Усл.-печ. л. 15,37
Тираж 500 экз.	Бумага офсетная № 1	Уч.-изд. л. 15,37
(I 3. – 30)		

Отпечатано в полиграфическом секторе
Издательства КГАСУ.
420043, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1