

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический

институт

Теплотехники и гидрогазодинамики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.А. Кулагин

подпись

инициалы, фамилия

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Разработка системы охлаждения элементов установки непрерывного литья и  
прессования цветных металлов

Тема

13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

код и наименование направления

13.04.01.01 «Энергетика теплотехнологий»

код и наименование магистерской программы

Руководитель

\_\_\_\_\_

подпись, дата

д.т.н., профессор

\_\_\_\_\_

должность, ученая степень

А.П.Скуратов

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Выпускник

\_\_\_\_\_

подпись, дата

В.А.Юнусов

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Красноярск 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Современные способы непрерывного литья и прессования цветных металлов .....	6
1.1 Основные этапы развития техники прессования цветных металлов.....	6
1.2 Основные методы и процессы непрерывного прессования цветных металлов.....	7
1.3 Прессование цветных металлов способом Конформ.....	19
1.4 Методы исследования и расчета процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов.....	24
1.5 Выводы и задачи исследования.....	32
2. Компьютерное моделирование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования... ..	33
2.1 Описание и принципы работы опытно-промышленной установки.....	33
2.2 Описание используемого программного продукта Ansys.....	34
2.3 Результаты моделирования процесса кристаллизации в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов.....	37
2.4 Выводы по главе 2.....	40
3. Экспериментальное исследование установки непрерывного литья и прессования цветных металлов.....	41
3.1 Описание и порядок проведения эксперимента.....	41
3.2 Результаты экспериментального исследования.....	42
3.3 Сравнение результатов экспериментального исследования с компьютерным расчетом.....	45
3.4 Выводы по главе 3.....	45
4. Разработка системы охлаждения элементов установки непрерывного литья и прессования цветных металлов .....	47

4.1 Анализ существующих систем охлаждения установок непрерывного литья и прессования цветных металлов.....	47
4.1.1 Система охлаждения водой.....	47
4.1.2 Система с органическим хладагентом.....	49
4.2 Разработка энергосберегающей системы охлаждения установки.....	51
4.3 Расчет и выбор оборудования для системы охлаждения.....	54
4.3.1 Выбор рабочего тела для охлаждения .....	54
4.3.2 Выбор конденсатора.....	56
4.3.3 Выбор циркуляционного насоса.....	56
4.4 Выводы по главе 4.....	56
Заключение.....	58
Список использованных источников.....	59
Приложение А Конструктивный расчет конденсатора .....	65
Приложение Б Конструкция конденсатора.....	76

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время совмещение процессов литья заготовки, пластической деформации и термообработки в единый непрерывный технологический процесс – одна из важнейших задач в металлургической промышленности.

Данная направленность обусловлена тем, что выше перечисленные методы получения металлических изделий из слитков предполагают значительные затраты энергии на нагрев слитков перед деформацией, значительную металлическую емкость прессового оборудования, наличие четко отлаженных производственных процессов, наличие больших производственных площадей, обслуживание высококвалифицированного персонала и т.д.

Опытно-промышленная установка, совмещающая процессы литья и прессования алюминиевых и медных сплавов, была спроектирована и испытана в лабораторных условиях кафедры ОМД Сибирского федерального университета.

Объектом исследования данной работы является установка непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов (НЛиП) с горизонтальным кристаллизатором.

Предметом исследования данной работы являются процессы теплообмена при охлаждения элементов установки (НЛиП).

Актуальность данной работы заключается в том, что процесс затвердевания заготовок и формирования их структуры, в ходе литья и прессования, в значительной мере предопределяется большой скоростью теплоотвода.

По этой причине производительность и качество заготовок зависит от системы охлаждения, то есть отвода тепла от кристаллизатора. Поэтому на сегодняшний день разработка эффективной системы охлаждения узлов установки является одной из приоритетных задач.

Кроме того, в целях энергосбережения следует предусмотреть при разработке систем охлаждения возможность вторичного использования отводимого тепла установкой,

Цель данной работы состоит в создании энергоэффективной системы охлаждения установки НЛиП на основе результатов экспериментального и расчетно-теоретического исследования ее тепловой работы.

В процессе выполнения работы были решены следующие задачи:

1. Изучены современные способы непрерывного процесса литья и обработки металлов давлением.

2. Проведен анализ компьютерного моделирования и экспериментального исследования процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в опытно-промышленной установке НЛиП.

3. Разработана система охлаждения элементов установки органическим хладагентом, позволяющая повысить ее энергетическую эффективность и за счет использования отводимого у парообразного хладагента теплоты водой в теплообменном аппарате (конденсаторе)

4. Произведен выбор конструкции и теплотехнический расчет конденсатора и циркуляционного насоса, входящих в систему охлаждения элементов установки НЛиП.

# **1. Современные способы непрерывного литья и прессования цветных металлов**

## **1.1 Основные этапы развития техники прессования металлов**

В настоящее время одной из основных перспектив развития металлургической отрасли промышленности является совмещение процессов термообработки, пластической деформации и литья заготовки. Данная направленность обусловлена тем, что выше перечисленные методы получения металлических изделий из слитков предполагают значительные затраты энергии на нагрев слитков перед деформацией, значительную металлическую емкость прессового оборудования, наличие четко отлаженных производственных процессов, наличие больших производственных площадей, обслуживание высококвалифицированного персонала и т.д [12]. Совмещение процессов литья заготовки, пластической деформации и термообработки в единый непрерывный технологический процесс, лишенный вышеперечисленных особенностей, – одна из важнейших задач в металлургической промышленности.

В XIX в. над решением проблемы создания непрерывного технологического процесса работали многие специалисты металлургической обрабатывающей промышленности, такие как Г. Бессемер, Г. Александер, Д. Грин, Т. Авитцура, Д. Проперци [11]. К достижениям отечественной металлургии с уверенностью можно отнести агрегаты непрерывного литья и прокатки, бесслитковой прокатки ленты, которые были разработаны и применены в промышленности специалистами таких крупных отечественных производств, как «ВНИИМетМаш», «Гипроцветметобработка» и др [28].

Помимо развития и применения прогрессивных методов непрерывного литья и прокатки в настоящее время ведутся работы, направленные на исследование и разработку более эффективных и удобных технологических линий, совмещающих процессы непрерывного литья и обработки металлов

давлением. Одним из таких направлений, позволяющих повысить технико-экономические показатели изготовления мелкосортной продукции в сравнении с традиционным прессованием на горизонтальных гидравлических прессах, является непрерывное литье и прессование цветных металлов [12]. Так, в последние годы получило широкое распространение создание технологических линий непрерывного прессования цветных металлов.

В результате процессов прессования металлов можно получить прессованную продукцию в виде полуфабрикатов и готовых изделий, к которым относятся сплошные, кольцевые и полые профили сложной конфигурации, трубы, панели и т.д. Основополагающим методом деформационной обработки является прессование – процесс выдавливания пресс-изделия из заготовки, помещенной в контейнер [13].

Основные этапы возникновения и развития техники прессования металлов представлены в таблице 1.1 [5, 7, 9].

## **1.2 Основные методы и процессы непрерывного прессования цветных металлов**

В настоящее время находят широкое применение большое разнообразие процессов прессования. Классификация данных процессов прессования производится по наиболее общим типовым признакам, а именно [48]:

- по кинематическим условиям процесса;
- по расположению канала матрицы;
- по граничным условиям процесса;
- по конструкции прессового инструмента;
- по температурным условиям;
- по виду продукции;
- по характеру прессуемого материала;
- по геометрическим условиям истечения;
- по типу оборудования.

Таблица 1.1 – Основные этапы развития техники прессования металлов

Этап	Содержание этапа
1. конец XVIII в. – конец XIX в.	1. изготовление свинцовых прутков и труб прессованием; 2. создание вертикальных трубных прессов с гидравлическим приводом;
2. 1895 – 1924 г.г.	1. развитие технологии прямого прессования изделий (прутков, труб, профилей) из медных и алюминиевых сплавов; 2. создание горизонтальных трубопрофильных гидравлических прессов; 3. разработка конструкций прессового инструмента
3. 1924 – 1944 г.г.	1. разработка технологии обратного и комбинированного прессования цветных металлов; 2. появление специализированных заводов, реализующих технологию прямого прессования цветных металлов;
4. 1944 – 1956 г.г.	1. применение прямого прессования для производства стальных пресс-изделий; 2. создание крупногабаритных и скоростных гидропрессов; 3. создание новых жаропрочных сталей и технологических смазок на основе стекла
5. 1956 – 1980 г.г.	1. разработка новых и модернизация существующих способов прессования; 2. производство крупногабаритных профилей, панелей и полуфабрикатов
6. 1980 г. – наст. время	разработка и внедрение процессов непрерывного литья и прессования цветных металлов

В процессе реализации большинства вышеперечисленных методов в конце рабочего цикла от изделия отделяется пресс-остаток, что свидетельствует о дискретном режиме истечения процесса прессования. Так, в последнее время



получили широкое распространение методы полунепрерывного и непрерывного прессования прутков и труб [10, 48, 49].

Существуют различные способы придания обрабатываемому металлу заданной формы посредством выдавливания его из замкнутого объема через канал, образуемый прессовым инструментом. При этом для всех способов характерно всестороннее неравномерное сжатие, которое представляет собой основной вид напряженного состояния деформируемого металла в пластической зоне. Помимо этого, часть обрабатываемого металла в результате неравномерной деформации подвержена напряженному состоянию с растягивающими главными нормальными напряжениями. Однако, не смотря на данные явления, при прессовании создаются оптимальные условия для пластической деформации, в отличие от других видов обработки металлов давлением [30].

В процессе прессования силовое воздействие на заготовку оказывается непосредственно через прессовый инструмент.

В зависимости от вида взаимного перемещения заготовки и контейнера выделяют следующие разновидности прессования:

- прямое прессование, которое получило наибольшее распространение и находит применение в изготовлении всех видов продукции, отличается обязательным, явно выраженным перемещением металла заготовки относительно покоящегося контейнера [8].

- прессование с обратным истечением, которое находит применение в изготовлении сплошных и полых профилей, отличается отсутствием явно выраженного перемещения заготовки относительно контейнера, а также обратным направлением движения пресс-изделия относительно пресс-штемпеля [2].

- прессование с совмещенным истечением металла применяется для совмещения прямого и обратного истечений для достижения больших скоростей истечения металла за счет снижения начальной температуры

заготовки и отсутствия перехода пресс-изделия в температурную зону хрупкости [24].

- прессование с опережающим заготовку движением контейнера, или прессование с активными силами трения [2, 6, 24], при котором контейнер движется в одном направлении с пресс-штемпелем, но с большей скоростью.

Применение существующих традиционных методов прессования позволяет довольно легко получить различные изделия при больших величинах обжатия, однако следует отметить, что при этом на каждом цикле прессования остаются отходы металла, которые впоследствии не находят дальнейшего применения, а закладка очередной заготовки в контейнер прессы сопровождаются временными затратами [12]. В результате таких процессов показатели производительности при прессовании обладают некоторыми ограничениями.

Таким образом, для решения вышеперечисленных проблем в последние годы получило широкое распространение развитие способов непрерывного прессования благодаря разработке и внедрению в промышленность агрегатов непрерывной разливки металлов.

В настоящее время реализуются и исследуются следующие способы непрерывного прессования металлов [41]:

- способ прессования без контейнера, суть которого заключается в периодическом выдавливании металла в матрицу силовым воздействием движущихся к матрице захватов, сжимающих заготовку;

- способы Конформ, Экстролдинг, совмещенная прокатка-прессование (СПП) и Линекс, при которых в качестве рабочего усилия прессования используется сила трения между заготовкой и контейнером;

- способ непрерывного гидростатического выдавливания с принудительной циркуляцией высоковязкой среды, передающей нагрузку.

Активная разработка ряда способов полунепрерывного и непрерывного литья металлов наметилась во второй половине XIX века как результат технической революции и резкого роста использования металлических

конструкций [21, 36]. Полученные способом полунепрерывного и непрерывного литья металлы в большинстве случаев далее подвергались обработке давлением. Как следствие, возникла необходимость объединения выше перечисленных операций в один технологический процесс непрерывного литья-прессования металлов. Поскольку основной объем получаемых слитков предназначается для прокатки, а, в свою очередь, техническое развитие страны определяется по доле металла, подвергаемого прокатке, в объеме общего выплавляемого металла, проектирование и создание непрерывных линий, совмещающих литье и прокатку, стало одним из основных направлений в развитии технологии металлообработки. Для достижения данной цели применяются в основном кристаллизаторы с подвижными стенками [15, 31, 38], на основе которых в настоящее время созданы линии литейно-плавильных агрегатов (ЛПА) по производству проката из цветных металлов и сплавов, отличающиеся высокой производительностью [32, 42, 43]. Использование литейно-плавильных агрегатов дает значительный экономический эффект в условиях масштабного массового производства, однако следует отметить, что для изготовления мелких серий на малых предприятиях использование данных линий проблематично из-за высокой стоимости прокатного оборудования и значительными затратами на его содержание и обслуживание. Наиболее ярко эта проблема проявляется при производстве мелкосортной продукции, при котором требуется большое количество комплектов калиброванных валков.

Последние разработки в области процессов непрерывного прессования цветных металлов позволяют решить данную проблему путем замены в литейно-плавильном агрегате прокатного стана на более универсальные установки непрерывного прессования металлов [36]. Установлено, что полученные таким образом пресс-изделия отличаются высоким качеством и относительно низкой себестоимостью их производства, что влечет и стимулирует повышенный спрос на установки непрерывного прессования металлов методом Конформ. В настоящее время внимание зарубежных и отечественных металлургов направлено на дальнейшую модернизацию и

совершенствование данного процесса в большей степени путем улучшения его технико-экономических показателей, а также путем совмещения операций литья и непрерывного прессования в одном агрегате. Последний метод позволит значительно снизить металлоемкость производственных линий, сделать их более гибкими и повысить степень их автоматизации [18, 33, 34]. Один из первых таких разработанных устройств с использованием машины Конформ был оснащен элементами роторного кристаллизатора Д. Проперци. Данный способ изготовления пресс-изделий разработан и запатентован в Англии и получил название способ Кастэкс [26]. Установка для прессования методом Кастэкс включает в себя систему непрерывной подачи металла в ручей колеса.

В камере прессового башмака, который закрывает всю нижнюю половину колеса-кристаллизатора, создается достаточно высокое давление для выпрессовывания металла через матрицу [5]. Именно здесь перед началом процесса должен отвердеть и накопиться металл. Далее расплавленный металл подводится через литейный ручей с регулятором наполнения и поступает прямо в канавку колеса, который подвергается интенсивному внутреннему охлаждению, в результате чего происходит непрерывное затвердевание металла в нижней части и по бокам ручья. Твердый металл собирается перед упором, останавливается и отпрессовывается по способу Конформ. Необходимо, чтобы процесс затвердевания металла происходил только в нижних слоях и по бокам ручья и не захватывал зону прессования металла. Хорошие металлургические свойства полуфабрикатов обусловлены во многом высокой скоростью затвердевания.

Описанный способ прессования Кастекс, когда жидкий металл заливается в установку, является одним из наиболее экономичных способов получения стандартной проволоки или профилей по сравнению с другими способами изготовления аналогичных изделий из твердого металла путем деформации.

Осуществление, поддержание стабильного и устойчивого процесса непрерывной кристаллизации жидкого металла и его прессования во многом

определяется эффективной работой системы непрерывной подачи расплавленного металла в канавку рабочего колеса [36]. При этом очень важно, чтобы расплавленный металл не подвергался затвердеванию в начальной фазе процесса; скорость перемещения расплавленного металла должна быть постоянной и соответствовать скорости его затвердевания, которая определяется интенсивностью отвода тепла от прессового инструмента, кроме того, необходимо исключить турбулентность в потоке расплавленного металла.

Использование базовой установки Конформ вызывает значительные затруднения в соблюдении вышеуказанных требований для непрерывной заливки жидкого металла, его кристаллизации и прессования. Особенно явно это проявляется в части стабилизации подачи металла в инструмент в результате намораживания жидкой фазы расплава при затвердевании на входную часть неподвижной кольцевой вставки. Устранение указанного недостатка станет возможным при совмещении непрерывного прессования и непрерывного литья на установке Конформ с вертикальной осью вращения колеса-кристаллизатора карусельного типа [34].

На основе анализа зарубежной и отечественной научной, технической и патентной литературе, описывающей современное состояние процессов прессования цветных металлов, установлено, что в иностранных государствах наиболее популярными и эффективными способами производства длинных мелкосортных профилей из цветных металлов и сплавов являются способы Конформ и Кастэкс.

Они послужили основой для создания сотен различных промышленных установок, направленных на выпуск широкой номенклатуры профилей, используя минимум затрат и получая высокое качество выпускаемой продукции.

В Российской Федерации внедрению способов прессования металлов способами Конформ и Кастэкс, к сожалению, не уделяется значительного и должного внимания, не смотря на явную перспективность использования

данных способов, а также на их популярность и широкое распространение в зарубежных странах.

Внедрение данных процессов в отечественную промышленность затруднительно вследствие недостатка научно-технической информации по методикам технического и технологического проектирования, а также его программного обеспечения. Решение указанной проблемы требует развития теоретической базы для научно-обоснованного проектирования и промышленной реализации процессов Конформ и Кастэкс для непрерывного прессования и совмещенного литья-прессования профилей из цветных металлов и сплавов.

Процесс непрерывного литья и прессования цветных металлов отличается достаточно быстрым нагревом элементов установки до высоких температур. Наиболее термонапряженным элементом установки непрерывного литья и прессования является матрица, которая перекрывает канавку вращающегося кристаллизатора.

В процессе прессования в результате трения о стенки кристаллизатора и пластической деформации металла под матрицей выделяется большое количество теплоты [33]. Для стабильной работы установки необходимо поддерживать температуру дугообразного сегмента с матрицей на необходимом по технологии уровне. Решение данной проблемы достигается путем использования принудительного охлаждения матрицы. Кроме того, таким образом можно управлять формированием структуры и свойств материала в процессе затвердевания: изменяя интенсивность охлаждения можно подобрать оптимальный режим отвода тепла, при котором ликвация и пористость не превышали бы допустимые значения, а термические напряжения в элементах установки были бы минимальны [34].

Для установления оптимального режима регулирования температуры необходимо изучить распределение температуры в пресс-форме. На поверхности пресс-формы и внутри нее температура в процессе прессования в

разных точках может быть различной, что приводит к неравномерному затвердеванию и ухудшению качества отливки.

В настоящее время для повышения производительности труда, а также для улучшения качества отливок и повышения стойкости пресс-форм предусмотрены различные системы охлаждения [18]. Данные системы предназначены не только для быстрого отвода тепла от рабочей установки, но и для создания направленного затвердевания, выравнивания и регулирования температурного поля пресс-форм.

Одним из наиболее распространенных способов охлаждения является водяное охлаждение пресс-формы проточной водой (или маслом). Постоянство температуры пресс-формы обеспечивается водяным охлаждением по системе каналов, выполняемых в ее стенках. Повышения стойкости пресс-формы добиваются применением водяного охлаждения, сокращением до минимума времени выдержки заготовки в матрице под давлением и после снятия давления.

Поскольку режим охлаждения пресс-формы существенно влияет на качество изделия, необходимо правильно рассчитывать и проектировать систему термостатирующих каналов формы, которая обеспечит поддержание требуемого теплового режима.

При выборе конструктивного решения системы каналов следует учитывать, что слишком большое увеличение скорости хладагента приводит к значительной неравномерности температурного поля формы. Длина каналов определяется из условия, что эффективная площадь поверхности каналов должна быть не менее охлаждаемой площади оформляющих поверхностей матрицы [26].

Так как при расчете размеров каналов охлаждения принимается ряд допущений, а также вследствие отличия расчетного времени охлаждения отливки от фактического, предусматривается возможность регулирования температуры формы путем регулирования средней температуры жидкости либо изменением расхода охлаждающей жидкости [17].

Внутри пресс-формы система охлаждения может быть последовательной или параллельной.

В параллельной системе охлаждения вода подается в несколько параллельных ответвлений из одного источника, который может быть установлен снаружи или встроен в пресс-форму.

К основным преимуществам параллельной системы можно отнести следующие показатели:

- равномерное распределение охлаждающей жидкости по каналам;
- поддержание одинаковых температуры и скорости течения охлаждающей жидкости в каналах.

Основные недостатки указанной системы:

- равномерность охлаждения может быть потеряна в результате сопротивления течению жидкости из-за изменений диаметров вторичных каналов;

- снижение эффективности охлаждения за счет снижения уровня турбулентности при распределении воды по параллельным каналам пресс-формы.

В последовательных системах охлаждения пресс-форм имеются один вход и один выход охлаждающей жидкости без ответвлений. Это приводит к относительно более длинному пути потока воды.

Преимущества последовательной системы заключаются в следующем:

- более высокая скорость течения воды через пресс-форму, чем в параллельной системе,

- более эффективное охлаждение вследствие большей турбулентности
- меньшее число входов и выходов в системе упрощает установку пресс-формы;

- большая вероятность постоянства скорости потока по всей длине.

К важнейшим недостаткам последовательных систем относятся:



-слишком большое падение давления по длине системы, в результате которого скорость течения понижается, что отрицательно сказывается на эффективности охлаждения;

-избыточное повышение температуры воды в длинной системе, которое приводит к колебаниям в охлаждении и, как следствие, к остаточным напряжениям и короблению отливки.

Для получения качественного изделия существенное значение имеют вентиляционные каналы, место расположения которых следует выбирать в соответствии с правилами расположения их в формах для литья [20]. Размеры вентиляционных каналов подбирают опытным путем в зависимости от размеров детали. После окончательной доводки при испытании формы эти каналы необходимо полировать и хромировать.

Таким образом, при выборе и конструировании системы охлаждения высокотемпературной установки необходимо учитывать следующие моменты:

1. Эффективность охлаждающей жидкости. Скорость течения должна быть достаточной для создания хорошей турбулентности потока. По мере увеличения турбулентности улучшается эффективность охлаждающей жидкости.

2. Температура охлаждающей жидкости. Температура охлаждающей жидкости для конкретных отливок и материалов должна быть сбалансирована с учетом времени охлаждения и качества изделия. Более теплая пресс-форма обычно приводит к получению отливки с меньшими остаточными напряжениями и лучшим качеством поверхности; но с экономической точки зрения предпочтительнее более низкие температуры для сокращения времени цикла.

3. Падение давления. Слишком длинные или малые в поперечном сечении участки в системе охлаждения приведут к повышенным давлениям. При избыточном давлении они вызовут снижение скорости течения.

Дополнительными факторами, увеличивающими падение давления, являются изгибы каналов под острым углом и фитинги, используемые для их соединения.

4. Расположение каналов охлаждения. Расположение системы охлаждения должно обеспечивать равномерное охлаждение всех частей отливки.

5. Охлаждающая жидкость. Охлаждающими жидкостями могут быть вода, водные растворы гликолей различной концентрации и масло. Вода является лучшей средой для отвода тепла, но ее применение ограничено температурами замерзания и кипения.

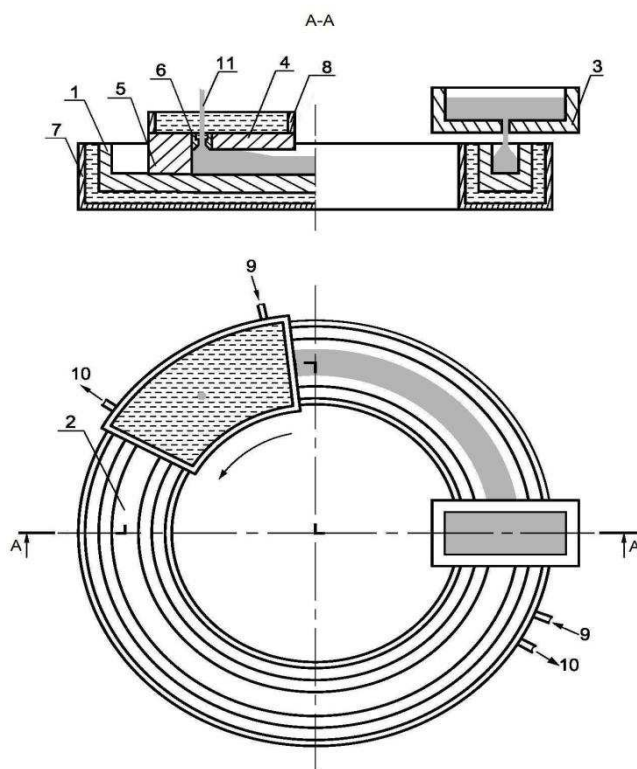
6. Загрязнение каналов системы охлаждения. Данное явление может возникать в результате осаждения минеральных солей на внутренних стенках каналов.

Такой осадок ограничивает течение воды и действует в качестве изолятора. Регулярная промывка каналов охлаждения раствором соляной кислоты способствует исключению минерального осадка. Также для снижения проблем загрязнения каналов в пресс-формах используются нержавеющие стали [3, 32, 37].

Наиболее эффективным, по совокупности рассмотренных выше признаков является устройство для охлаждения установки непрерывного литья-прессования металлов, содержащее колесо-кристаллизатор с кольцевой канавкой, которая вверху сопряжена с неподвижным дугообразным сегментом, заканчивающимся выступом, перекрывающим поперечное сечение канавки и установленная перед выступом пресс-матрица, коллектор для охлаждения дна кристаллизатора, устройство дополнительно снабжено коллекторами, один из которых охватывает внутреннюю и наружную поверхности колеса-кристаллизатора, а другой установлен на верхней поверхности дугообразного сегмента представлен на рисунке 1.1.

### 1.3 Прессование цветных металлов способом Конформ

Способ Конформ занимает особое место среди перечисленных методов непрерывного прессования металлов, поскольку отличается более эффективными технико-экономическими показателями, а также широкой сферой применения. Кроме того, данный способ является особенно перспективным и актуальным для использования в цветной металлургической промышленности [3, 20].



- 1 – колесо-кристаллизатор; 2 – ручей; 3 – дозатор; 4 – башмак; 5 – упор; 6 – матрица;  
7, 8 – коллектор; 9, 10 – патрубки

Рисунок 1.1 – Устройство для охлаждения инструмента установки непрерывного литья-прессования цветных металлов и сплавов

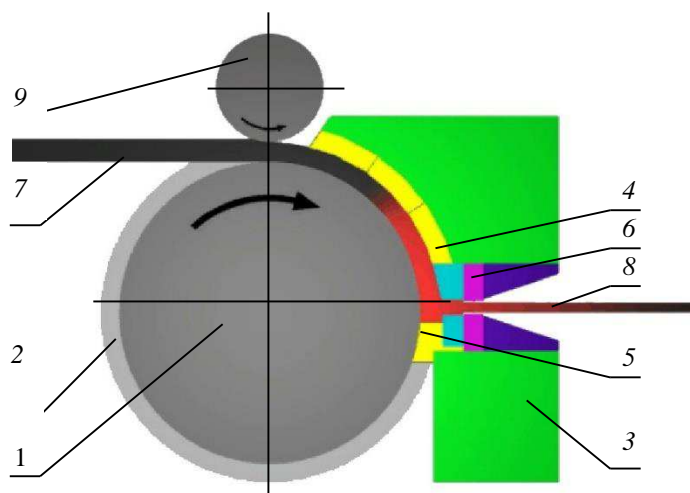
Способ Конформ был предложен Д. Грином в 1970 г., запатентован в 1971 г. (патент №1370894 GB). Впервые данный способ был опробован на модели для пластилина, далее последовало изготовление настольной модели с

ручным приводом, где прессованию подвергался свинец. Впоследствии были созданы несколько модификаций установки МК2:

- модель МК2А (1972 г.), где в качестве заготовки использовался пруток из алюминия диаметром 6,36 мм.;

- модели МК2В, МК2С, где в качестве заготовки использовались прутки из алюминия и меди диаметром 9,5 мм.

В основе способа Конформ (рисунок 1.2) лежит применение подвижного вращающегося колеса с врезанной канавкой и примыкающего к нему неподвижного инструмента, называемого башмаком. В торце башмака находится матрица, перекрывающая врезанную в колесо канавку. В качестве заготовки используется пруток 7, который задается в ручей 2, который выполнен в виде кольцевой канавки в рабочем колесе 1 и с внешней стороны закрыт прижимным башмаком 3. На внутренней поверхности башмака находится выступ 4, который охватывает заготовку 7. Блок инструмента с прессовой матрицей 5 также закреплен в башмаке [19].



1 – рабочее колесо; 2 – кольцевая канавка; 3 – башмак; 4 – кольцевая вставка; 5 – вставка;  
6 – матрица; 7 – заготовка; 8 – изделие; 9 – валок

Рисунок 1.2 – Принципиальная схема реализации процесса непрерывного прессования по способу Конформ [30]

Прутковая заготовка обладает диаметром меньшим, чем ширина канавки между башмаком и колесом; заготовка подается в данный зазор и постепенно продвигается под воздействием сил трения в камеру прессования и в конечном итоге достигает матрицы.

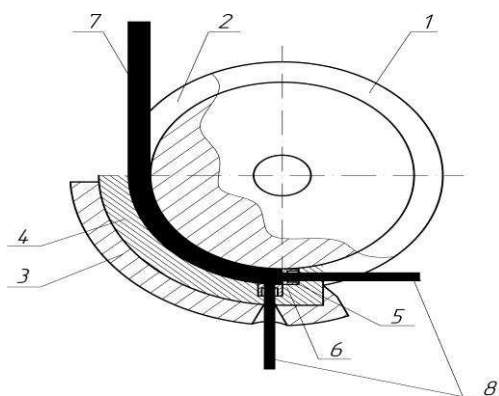
В зоне, расположенной перед матрицей, заготовка подвергается интенсивному пластическому деформированию и заполняет все сечение канавки, что способствует увеличению сил трения между поверхностью канавки и заготовкой. При повороте колеса возрастает сжимающее усилие, приложенное к заготовке, затем усилие достигает такой величины, которая необходима для выдавливания заготовки через отверстие в матрице, т. е. начинается процесс прессования. Зона неполного контакта заготовки с поверхностью канавки, или зона первичного захвата, необходима для развития давления для пластического деформирования материала и заполнения пространства в зоне, расположенной перед матрицей. Заготовкой при использовании данного способа прессования может служить обычная проволока. При этом процесс ее деформирования, включающий в себя такие процессы, как втягивание в камеру прессования по мере поворота колеса, предварительное профилирование, заполнение зазора в колесе, создание рабочего усилия и, наконец, прессование, протекает непрерывно (другими словами, реализуется технология непрерывного выдавливания) [37].

Следует отметить, что если вместо сплошной заготовки в камеру прессования непрерывно подавать порошковый или гранулированный материал, то заполнение камеры и нарастание давления будет происходить совершенно аналогичным образом. Выделяющееся при трении материала о поверхность башмака высокое давление и теплота способствуют свариванию частиц материала, при этом, как следствие, достигается непрерывное прессование сплошного изделия [32].

В процессе прессования меди способом Конформ необходимо, чтобы длина захватывающей части инструмента была существенно больше, чем при прессовании алюминия, поскольку медь не имеет свойства налипания на

поверхность инструмента. Механические и электрические свойства медной проволоки, полученные способом Конформ выше, а проволоки из алюминия несколько ниже (исключение – электропроводность), чем у проволоки, полученной волочением с последующим отжигом [19]. Выбирая соответствующую форму отверстия матрицы, можно получить проволоку круглого или прямоугольного сечения, а используя язычковые матрицы, можно прессовать полые изделия.

В зоне, расположенной непосредственно перед матрицей, материал заготовки подвергается действию высокого давления, при котором происходит пластическое течение. При этом возможно выдавливание не только в направлении вращения колеса по касательной к его окружности, но и в перпендикулярном ему направлении, причем во многих случаях последний вариант оказывается предпочтительным (рисунок 1.3).

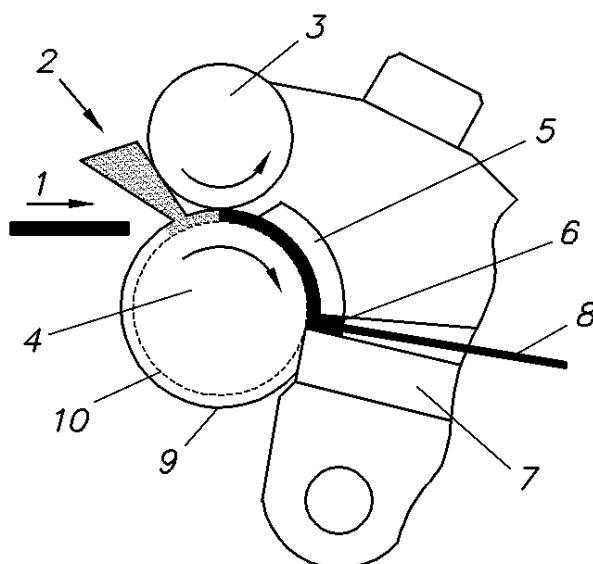


1 – приводное колесо; 2 – кольцевая канавка; 3 – башмак; 4 – кольцевая вставка;  
5,6 – матрицы; 7 – прутковая заготовка; 8 – пресс-изделие

Рисунок 1.3 – Схема непрерывного прессования способом Конформ

Главным фактором, определяющим возможность внедрения способа Конформ в промышленность, является не только непрерывность процесса, но и его экономическая эффективность при производстве, связанная с меньшими капитальными затратами [15].

Для некоторых материалов, которые в силу их физических свойств или формы с трудом покрывают ручей колеса, применяют предварительное компактирование подаваемого материала в зоне ручья колеса с помощью приводного валка 3, который вмонтирован между бункером и входом в инструмент (рисунок 1.4). При обработке металлов на основе алюминия использование приводного данного валка не всегда обязательно, так как налипающее покрытие из алюминия легко образуется в ручье колеса. В то же время при его применении предварительное компактирование исходного дробленого металла увеличивает производительность и уменьшает возможность захвата воздуха, который в свою очередь может привести к образованию пузырей или раковин на поверхности изделия. Для частиц с высоким отношением  $L/d$  (рубленной проволоки), которые не могут легко входить в ручей колеса за счет силы тяжести, эффективно может быть использован тангенциальный ручей с вибратором или поршневым плунжером [15].



- 1 – подача прутковой заготовки; 2 – подача частиц из бункера; 3 – приводной валок;  
 4 – колесо; 5 – кольцевая вставка; 6 – матрица; 7 – упор; 8 – полуфабрикат;  
 9 – периферийная поверхность колеса; 10 – основание ручья

Рисунок 1.4 – Схема установки Конформ для порошковых материалов

Ранние конструкции матрицы для установки Конформ имели ограничения по диаметру или профилю, поскольку предполагалось, что размер матрицы не должен превышать площадь поперечного сечения ручья колеса. Последующие эксперименты доказали, что возможно применение прессования с расширяющейся у матрицы камерой, которая принимает окончательный размер вне этого ограничения и позволяет увеличить габариты изготавливаемой продукции [47]. Таким образом осуществлялось прессование изделий, имеющих размеры, большие размеров исходного прутка.

#### **1.4 Методы исследования и расчета процесса непрерывного литья и прессования цветных металлов**

При непрерывном прессовании способом Конформ давление возникает в результате контактного трения между поверхностью кольцевой канавки приводного колеса и заготовкой. Такие параметры процесса непрерывного прессования, как крутящий момент на валу колеса, давление прессования и мощность электрического привода установки, определяются величиной контактной площади заготовки с инструментом. Для расчета последней величины существуют графический, графоаналитический и аналитический методы, а также ряд эмпирических зависимостей [19]. Контактная площадь определяется поверхностью, ограниченной проекцией линии пересечения заготовки с поверхностью инструмента. Вследствие данного факта перед расчетом площади контакта между заготовкой и инструментом необходимо определить поперечные размеры контейнера, обеспечивающие продвижение заготовки за счет сил контактного трения. После определения необходимых размеров можно рассчитать длину контакта между контейнером и заготовкой, которая обеспечивает площадь трения для создания усилия необходимой величины для прессования металла.



На данный момент непрерывное прессование способом Конформ является наиболее распространенным и популярным, поскольку отличается малой энергоемкостью и высокой производительностью. Используя данный метод, можно получить пресс-изделия достаточно больших размеров и с большими степенями деформации. Существенным недостатком при непрерывном прессовании методом Конформ является, то что между заготовкой и неподвижной частью контейнера возникает повышенное трение. Кроме того, сложность составляет управление температурными режимами в очаге деформации.

В установках Конформ используется кольцевой контейнер с поперечным сечением прямоугольной и квадратной формы. При попадании в ручей круглой прутковой заготовки она подвергается незначительному обжатию и продвигается до упора, который перекрывает поперечное сечение контейнера на выходе участка сопряжения калибра с неподвижной сегментной вставкой. По мере прекращения продольного перемещения заготовки начинается процесс ее распрессовки до полного заполнения поперечного сечения контейнера. Площадь контакта металла с калибром возрастает ровно до того момента, пока величина сил контактного трения не достигнет величины, необходимой для выдавливания металла через канал матрицы.

Таким образом, можно утверждать, что контейнер по длине делится на две зоны [14, 19]. Первая представляет собой зону неполного контакта металла с боковой поверхностью контейнера при небольшом обжатии заготовки после ее подачи в ручей колеса; вторая – зона полного контакта металла по сечению контейнера в результате распрессовки заготовки.

Поперечное сечение контейнера обычно выполняют прямоугольной и квадратной формы. Металл подается к матрице по трем сторонам ручья колеса в результате контактного трения в зоне полного контакта. При этом металл движется неравномерно по контейнеру в результате преодоления силы трения по неподвижной четвертой стороне ручья. В следствие неравномерности движения металла образуется зона прилипания в приконтактном к сегменту

слое. Для того, чтобы исключить это нежелательное явление, необходимо определить соотношение между шириной и высотой поперечного сечения контейнера, когда пластическая деформация металла охватывает всю зону полного контакта.

Значительное воздействие на силовые условия процесса непрерывного прессования металла оказывает величина входного угла пресс-матрицы. Данный факт обусловлен тем, что размеры поперечного сечения контейнера при способе непрерывного прессования Конформ намного меньше, чем установках при традиционном прессовании. Так, силы контактного трения во входной зоне пресс-матрицы оказывают огромное влияние на силовые параметры процесса непрерывного прессования металла. Неравномерность движения металла по сечению контейнера приводит к увеличению остаточных напряжений на выходе пресс-изделия из пресс-матрицы. Качество пресс-изделия определяется данным уровнем остаточных напряжений. Так, например, при достижении данного уровня величины, которая близка к величине временного сопротивления разрыву сплава, происходит образование трещин и разрушение прессовки. Неравномерность движения металла можно уменьшить путем подачи смазки на неподвижную поверхность контакта заготовки и контейнера. Однако данным способ снижения неравномерности не используется на практике из-за трудности его осуществления. Также следует отметить, что еще одним фактором, оказывающим значительное влияние на степень неравномерности течения металла при входе в канал пресс-матрицы, является угол наклона ее последней оси к направлению движения заготовки.

На основании выше перечисленных факторов, влияющих на неравномерность течения металла, можно установить следующий порядок для определения размеров и формы деформирующего инструмента для непрерывного прессования металлов способом Конформ:

- определение такого соотношения высоты и ширины прямоугольного сечения контейнера, при котором поверхность покоящейся части контейнера

является границей пластической области, по высоте, движущейся вдоль контейнера заготовки;

- определение входного угла пресс-матрицы, который обеспечивает наименьшую удельную силу прессования;

- определение длины зоны полного контакта, необходимой для действия силы контактного трения на процесс прессования;

- определение длины зоны неполного контакта;

- определение угла между продольными осями контейнера и канала матрицы, который обеспечивает равномерное движение металла по сечению деформационной зоны.

Силовые условия проведения процесса непрерывного прессования, прежде всего, определяют такие факторы, как сопротивление пластической деформации прессуемого металла  $\sigma_s$ , величина которого зависит от его прочностных свойств, температуры, скорости и степени деформации, размеров поперечного сечения контейнера и величины коэффициента вытяжки [33].

Прессование в горячем состоянии – неотъемлемое условие прессования металлов и различных сплавов. Температура и скорость течения металла при прессовании выступают основными технологическими факторами процесса непрерывного прессования металлов и их сплавов. От температуры нагрева инструмента прессования и заготовки для прессования, а также от скорости прессования (другими словами, температурно-скоростной режим) зависит ряд важных технологических параметров:

- температура прессуемого металла в процессе выдавливания;

- энергосиловые параметры процесса непрерывного прессования;

- характер течения металла в ручье колеса;

- равномерность свойств и структуры пресс-изделия;

- стойкость прессового инструмента;

- технико-экономические показатели процесса прессования в целом.

Температурно-скоростной режим прессования играет определяющую роль при создании оптимальных условий процесса прессования, а именно:

достижения максимальной скорости при прессовании и получения необходимого и достаточного качества получаемых пресс-изделий. Следует отметить, что высокая температура прессования может не только послужить причиной снижения качества пресс-изделий, но и привести к появлению бракованных изделий. В свою очередь низкая температура прессования приводит к возрастанию сопротивления деформации, поэтому процесс прессования не может быть осуществлен в следствие превышения усилия прессования на усилием используемого оборудования для прессования. Так, для оптимального температурно-скоростного режима прессования необходимо избежать обоих указанных граничных случаев.

Прессование профилей обычно проводится без смазывающей жидкости и представляет собой один из самых энергоемких процессов ОМД, при котором большая часть затраченной на осуществление процесса энергии идет на образование тепла. По мере увеличения скорости прессования, температура прессования также значительно возрастает. Для каждого алюминиевого сплава определена своя, свойственная только данному сплаву, «критическая» температура, при которой пресс-изделие подвергается разрушению. Температура прессования не должна достигать значений, выше критической температуры сплава. Так, тепловые условия прессования алюминиевых сплавов оказывают решающее влияние на эффективность производства пресс-изделий. Как следствие, актуальной становится задача анализа теплового взаимодействия системы металл-инструмент, а также задача определения зависимости изменения тепловых условий в процессе прессования. Поскольку тепловое взаимодействие при прессовании представляет собой достаточно сложный процесс, его анализ следует свести к ориентировочной оценке, используя уравнение теплового баланса системы «деформируемый металл – инструмент прессования – окружающая среда в очаге деформации» [14].

Уравнение теплового баланса очага пластической деформации имеет вид в единицу времени:

$$Q_3 + Q_d + Q_{TP} - Q_{IP} - Q_{OХЛ} = 0, \quad (1.1)$$

где  $Q_3$  – тепло, поступающее в пластическую зону с заготовкой, имеющей начальную температуру  $T_0$ ;

$Q_d$  – тепловыделение от работы пластической деформации;

$Q_{TP}$  – тепло от преодоления трения с неподвижным инструментом;

$Q_{IP}$  – тепло, уносимое из пластической зоны пресс-изделием (профилем);

$Q_{OХЛ}$  – тепло, уходящее в окружающую среду через инструмент.

Использование данной методики уместно для стационарного температурного режима, установившегося в процессе непрерывного прессования, либо естественным путем в результате теплообмена путем конвекции между инструментом и окружающей средой, либо при помощи принудительной системы охлаждения инструмента, заготовки и пресс-изделия.

Учитывая указанные факторы, при составлении уравнения теплового баланса необходимо учитывать определенные допущения:

- изотропность и однородность контактирующих тел в процессе деформации;
- отсутствие постороннего тепла на границе контакта металла и инструмента;
- соблюдение изотермических условий и постоянной скорости течения металла в процессе непрерывного прессования металлов;
- преобразование работы сил трения и деформации в теплоту;
- поперечное сечение контейнера принято квадратным ( $h = b$ );
- равенство коэффициентов трения по всем его поверхностям контакта с деформируемым металлом.

Принимая в учет указанные положения, формула для вычисления  $Q_3$  принимает следующий вид:

$$Q_3 = T_0 b^2 \rho \cdot c \cdot v_0, \quad (1.2)$$

где  $\rho$  и  $c$  – соответственно плотность и теплоемкость материала заготовки;

$v_0$  – скорость подачи заготовки в контейнер;

$T_0$  – начальная температура заготовки.

Расчет  $Q_d$  можно провести, воспользовавшись формулой для прессования с боковым истечением деформируемого металла:

$$Q_d = \sigma_s(T, \varepsilon, \xi)(1,45\lambda + 0,8)b^2\lambda \cdot v_0, \quad (1.3)$$

$$Q_d = b^2v_0\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)\ln\lambda \left\{ \frac{2f}{\sin\beta} + \frac{1}{27tg^2\frac{\beta}{2}} \left[ \left(12 + 9tg^2\frac{\beta}{2}\right)^{\frac{3}{2}} - 12^{\frac{3}{2}} \right] \right\}. \quad (1.4)$$

где  $\sigma_s(T, \varepsilon, \xi)$  – сопротивление деформации материала заготовки, значение которого можно представить в виде эмпирической зависимости.

Значение  $Q_{TP}$  определится следующим выражением:

$$Q_{TP} = 4b \cdot \sigma_s(T, \varepsilon, \xi) \cdot f \cdot R \cdot \varphi_1 \cdot v_0, \quad (1.5)$$

$$\text{где } \varphi_1 = \frac{b \ln \lambda}{\sqrt{3} \cdot R} \left( \frac{1}{\sin 2\beta} + \frac{1}{27tg^2\beta} \left( (12 + 9tg^2\beta)^{\frac{3}{2}} - 12^{\frac{3}{2}} \right) \right);$$

$Q_{TP}$  – тепло, уносимое из пластической зоны пресс-изделием;

$Q_{OХЛ}$  – тепло, уходящее в окружающую среду через инструмент.

Тепло, уносимое из пластической зоны пресс-изделием:

$$Q_{TP} = F_{np} T_{np} \rho c v_{np}, \quad (1.6)$$

где  $T_{np}$  – температура профиля на выходе из канала матрицы;

$F_{np}$  – площадь поперечного сечения профиля.

Доля тепла, уходящего из деформационной зоны через инструмент в окружающую среду, определяется выражением:

$$Q_{охл} = (T_K - T_C) \cdot \left[ R \left( \varphi_1 + \varphi_2 \frac{b}{\alpha_K} \right) \cdot 4 \cdot b + F_v \right] / (S_K / \Lambda + 1 / \alpha_K), \quad (1.7)$$

где  $\Lambda$  и  $\alpha_K$  – теплопроводность материала инструмента и коэффициент теплоотдачи соответственно;

$S_K$  – толщина стенок контейнера;

$T_K$  и  $T_C$  – температура контейнера и окружающей среды.

Следует отметить, что при использовании принудительного охлаждения инструмента данная формула примет совершенно другой вид и в значительной мере будет зависеть от устройства и метода охлаждения.

Использование полученных значений позволит в первом приближении оценить выходную температуру профиля:

$$T_{пп} = T_0 + \frac{\sigma_s}{\rho c} \left[ (1,45\lambda + 0,8) \lambda + \frac{2R\varphi_1}{b} \right] - \frac{(T_K - T_C)(4R\varphi_1 + b)}{\rho c v_0 b (S_K / \Lambda + 1 / \alpha_K)}. \quad (1.8)$$

Использование данной методики расчета для выбора температурно-скоростных режимов непрерывного прессования металлов с учетом сопротивления деформации от температуры, степени и скорости позволяет в первом приближении установить рациональный режим и выбрать пути по его совершенствованию.

## 1.5 Выводы и задачи исследования

В результате анализа литературных источников и состояния современных процессов обработки цветных металлов давлением определено, что наиболее распространенным и эффективным из рассмотренных методов является прессование цветных металлов способом Конформ. Установлено, что при всех преимуществах данного метода существует ряд проблем, возникающих при его применении. В большей степени эти проблемы обусловлены ненадежной работой установки и необходимостью регулирования тепловой работы установки в переходном режиме. Для вывода установки на стационарную работу необходимо стабилизировать тепловой режим установки работы без нарушения технологического процесса, для чего необходима надежная система отвода тепла.

Цель данной работы состоит в создании энергоэффективной системы охлаждения установки НЛиП на основе результатов экспериментального и расчетно-теоретического исследования ее тепловой работы.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

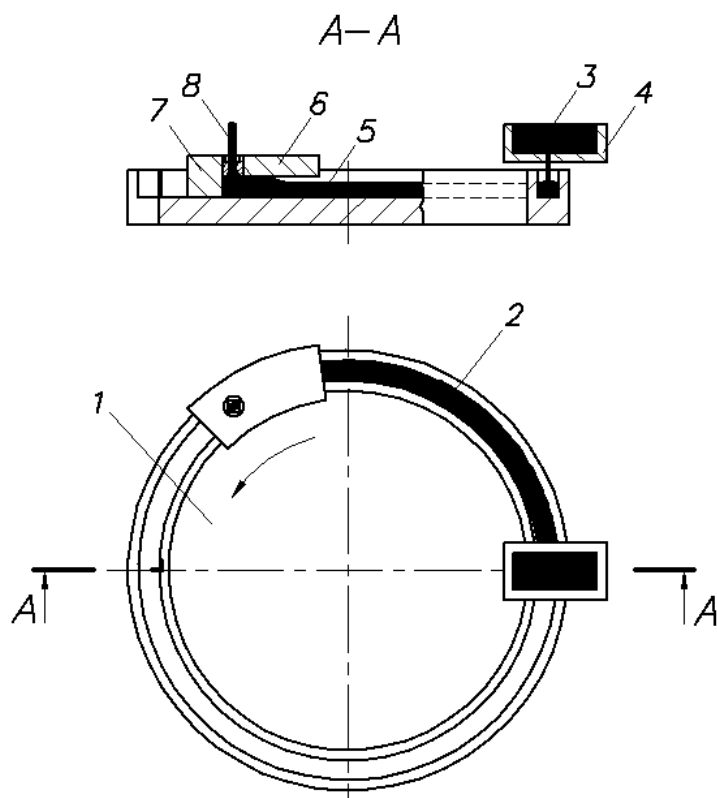
1. Провести анализ компьютерного моделирования теплообмена в полупромышленной установке НЛиП с горизонтальным кристаллизатором;
2. Ознакомиться с экспериментальным исследованием процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке НЛиП;
3. Провести анализ и выбрать наиболее эффективную схему охлаждения установки НЛиП.
4. Разработать энергосберегающую систему охлаждения установки НЛиП цветных металлов и сплавов и произвести теплотехнический расчет основных ее элементов.



## 2. Компьютерное моделирование процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке непрерывного литья и прессования

### 2.1 Описание и принципы работы опытно-промышленной установки

Схема совмещения непрерывного литья-прессования металла с помощью установки Конформ, выполненной на базе карусельного кристаллизатора приведена на рисунке 2.1.



1 – колесо-кристаллизатор; 2 – ручей; 3 – жидкий металл; 4 – литниковая коробка;  
5 – слиток; 6 – матрицедержатель; 7 – матрица; 8 – пресс-изделие

Рисунок 2.1 – Схема установки непрерывного литья-прессования с вертикальной осью вращения колеса

Жидкий металл 3 заливается через дозатор 4 в ручей 2 вращающегося рабочего колеса 1 и кристаллизуется до входа в камеру прессования. Камера прессования в свою очередь образована на участке сопряжения ручья с матрицедержателем 6. Слиток 5 поступает в камеру прессования и выдавливается в отверстие матрицы 7 в виде пресс-изделия. При этом процесс заливки жидкого металла в канавку, его кристаллизация и прессование идет непрерывно и соблюдение всех вышеуказанных требований не представляет трудностей.

Опытно-промышленная установка, совмещающая процессы литья и прессования алюминиевых и медных сплавов, действующая по представленной выше схеме, была спроектирована и испытана в лабораторных условиях кафедры ОМД Сибирского федерального университета.

## **2.2 Описание используемого программного продукта Ansys**

ANSYS CFX – инструмент для оптимизации процесса разработки и технологической подготовки в области вычислительной динамики жидкостей и газов. ANSYS CFX совмещает в себе передовую технологию решателя с современным пользовательским интерфейсом и адаптивной архитектурой, что делает этот инструмент доступным как для разработчиков, владеющих общими инженерными знаниями, так и для специалистов в области гидродинамики, работающими с моделью и ее свойствами на глубоком уровне. CFX позволяет детально изучить оборудование и процессы изнутри, повысить эффективность, увеличить срок службы и оптимизировать процессы.

Модуль ANSYS CFX полностью интегрирован в расчетную среду ANSYS Workbench - платформу, объединяющую все инструменты инженерного моделирования компании ANSYS. Адаптивная архитектура позволяет пользователю выполнять любые действия от стандартного анализа течения жидкости или газа до обработки сложных взаимодействующих систем. Пользователи могут легко оценить производительность во множественных

расчетных точках или сравнить несколько альтернативных конструкций. Для решения задач из различных расчетных дисциплин в рамках платформы ANSYS Workbench можно получить доступ к общим для всех расчетов инструментам, таким как инструменты для работы с геометрией ANSYS DesignModeler и с сеткой ANSYS Meshing.

Геометрия создается в модуле ANSYS DesignModeler, специально разработанном для создания геометрии, ее подготовки к моделированию. Эта полностью параметрическая среда является простой в использовании, обладает прямыми и двусторонними связями со всеми основными CAD-пакетами и используется как средство согласования и ввода геометрии во все программные продукты ANSYS для последующих инженерных расчетов.

Для получения точных результатов расчетов в области вычислительной динамики жидкостей и газов необходима самая совершенная технология создания сетки. ANSYS Meshing предоставляет множество технологий построения сетки в одном приложении. Это дает возможность выбрать наиболее подходящий способ построения сетки на основе применения подхода последовательного построения сетки на каждой из деталей сборки.

Физический препроцессор ANSYS CFX - это современный, интуитивно понятный интерфейс для подготовки к моделированию динамики жидкостей или газов. В дополнение к основному режиму работы встроенный мастер помогает пользователю пройти процесс подготовки общих расчетов течения жидкостей или газов.

Мощный язык программирования дает возможность задать описание проблемы в числовом виде, как в случае со сложными граничными условиями, авторскими моделями материалов или дополнительными уравнениями переноса. Адаптивная архитектура CFX-Pre также позволяет пользователю создавать собственные панели графического пользовательского интерфейса, чтобы стандартизировать ввод для выбранных приложений.

Сердцем модуля решателя Ansys CFX Solver является передовой алгебраический многосеточный сопряженный решатель, использующий

технологии Coupled Algebraic Multigrid, являющуюся ключом к получению точных результатов в короткие сроки. Параметры решателя, граничные условия могут быть скорректированы во время выполнения расчета, при этом нет необходимости останавливать решатель. Решатель ANSYS CFX использует схему дискретизации второго порядка по умолчанию, обеспечивая получение максимально точных результатов.

Использование технологии сопряженных решателей ANSYS CFX дает значительные преимущества при проведении любого расчета и позволяет получить устойчивые и масштабируемые решения для задач динамики жидкостей и газов.

Описание результатов графического и количественного анализа, полученных в ANSYS CFX, выполняется в ANSYS CFD-Post. Возможность написания сценариев, полная автоматизация, генерация отчетов, дают пользователю максимальное количество информации, полученной в результате расчетов.

Ansys CFX и Ansys FLUENT – это основные продукты для задач гидрогазодинамики общего назначения, предлагаемые компанией ANSYS, Inc. Оба решателя разрабатывались в течение десятилетий независимо друг от друга и обладают несколькими существенными отличиями, несмотря на некоторые схожие черты. Оба модуля основаны на методе контрольных объемов, дающем высокую точность, и используют решатель по давлению, что позволяет применять эти продукты для решения широкого круга инженерных задач. Основные отличия состоят в способе интегрирования уравнений течения жидкостей и в стратегиях решения уравнений.

Решатель ANSYS CFX использует сетку конечных элементов (числовые значения в узлах сетки), схожую с теми, что используется в анализе прочности, для дискретизации области. В отличие от ANSYS CFX, решатель ANSYS FLUENT использует сетку конечных объемов (числовые значения в центрах ячеек). В итоге оба подхода формируют уравнения для конечных объемов, которые обеспечивают сохранение значений потока, что является необходимым

условием для точных решений задач гидрогазодинамики. В ANSYS CFX особый упор сделан на решение основных уравнений движения (сопряженная алгебраическая сетка), а ANSYS FLUENT предлагает несколько подходов к решению (метод на основе плотности, расщепленный метод на основе давления, сопряженный метод на основе давления). Оба решателя содержат в себе самые ценные возможности физического моделирования для получения максимально точных результатов.

### 2.3 Результаты моделирования процесса кристаллизации в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов

В результате компьютерного моделирования процесса непрерывного литья были получены зависимости изменения угла затвердевания  $\varphi_s$  от времени работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов. Полученные в процессе расчётного исследования графики для сплава АК-12, сплава АД-31 и чистого алюминия приведены на рисунках 2.2-2.4.

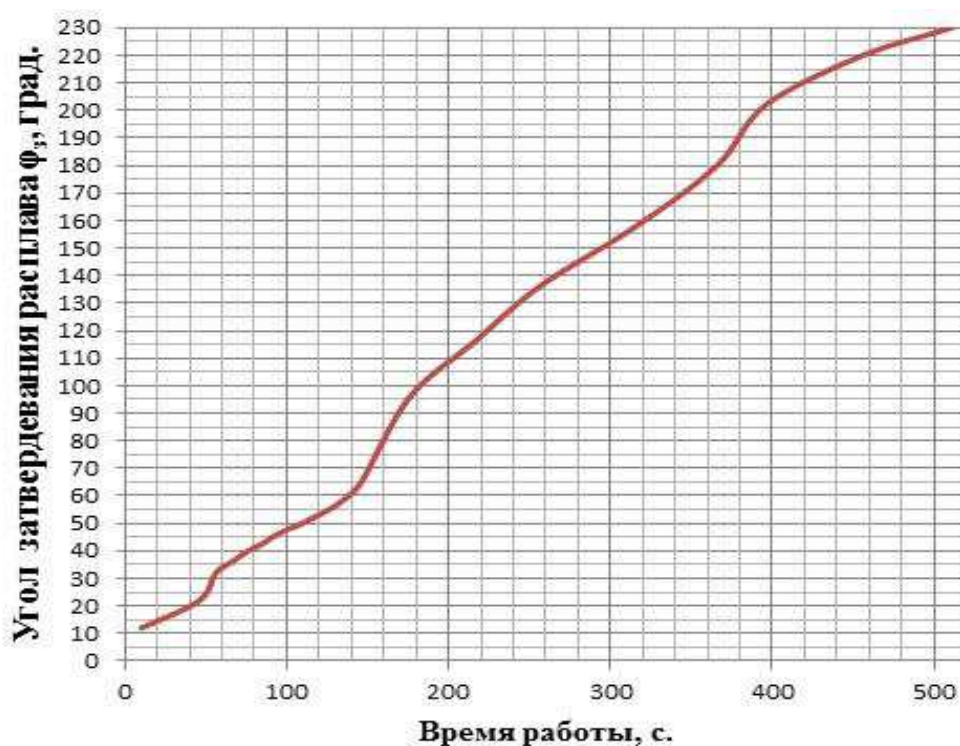


Рисунок 2.2 – Изменение угла затвердевания расплава  $\varphi_s$  в переходном тепловом режиме работы установки для сплава АК-12

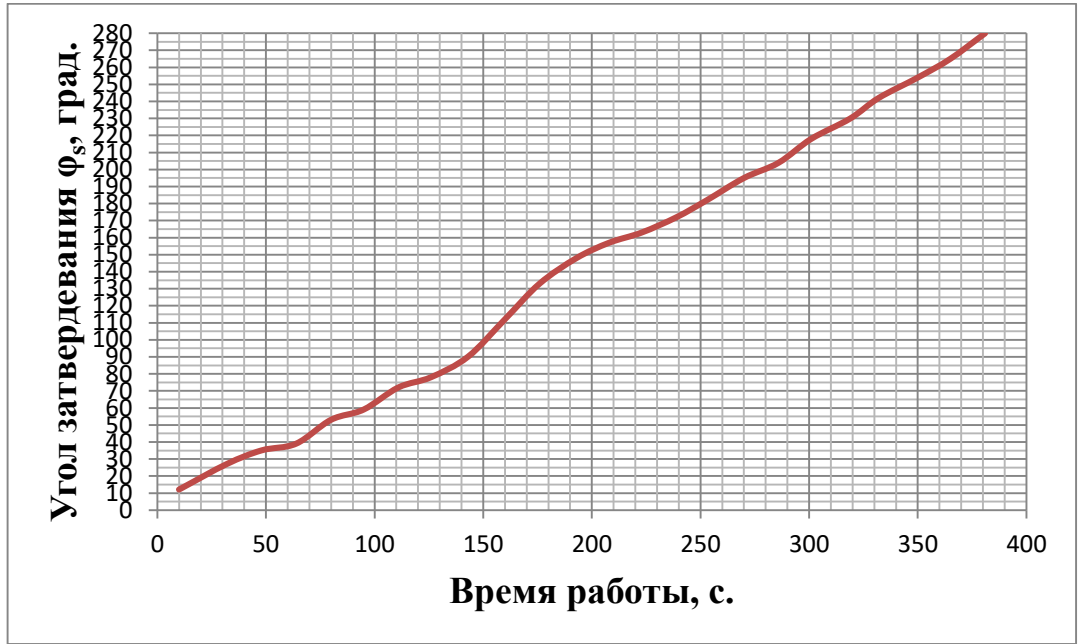


Рисунок 2.3 – Изменение угла затвердевания расплава  $\phi_s$  в переходном тепловом режиме работы установки для сплава АД-31

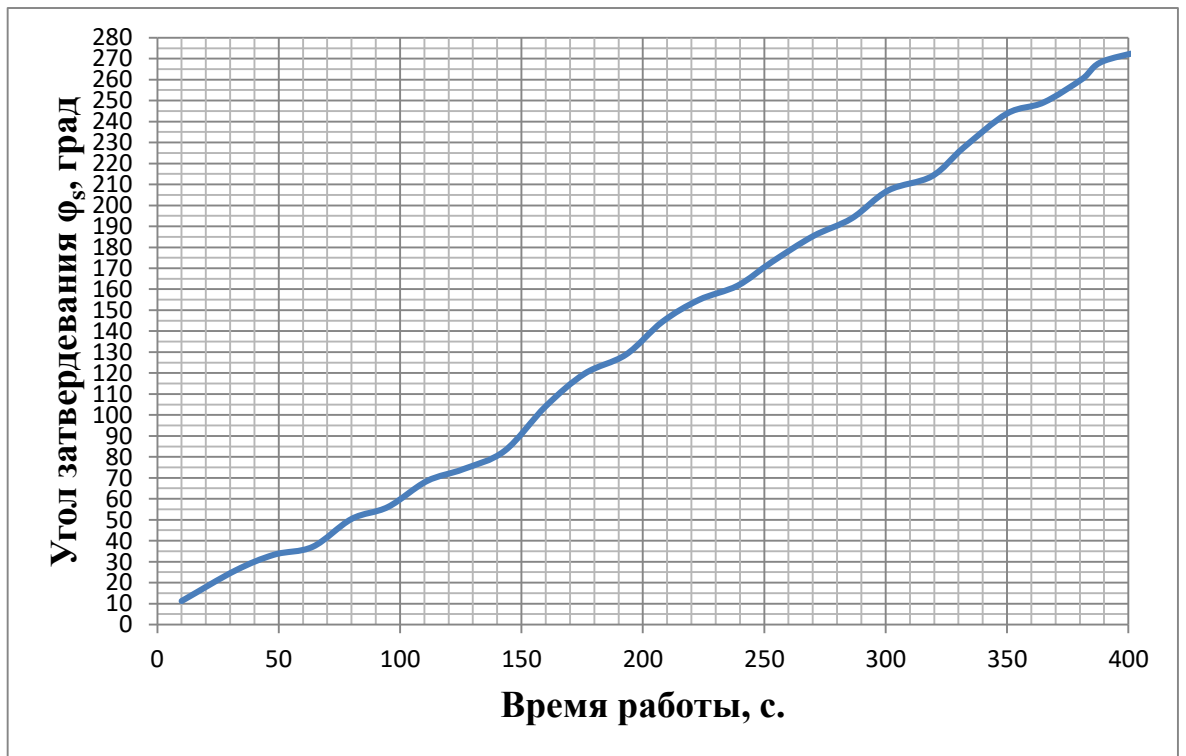


Рисунок 2.4 – Изменение угла затвердевания расплава  $\phi_s$  в переходном тепловом режиме работы установки для чистого алюминия

Таким образом, в результате моделирования процесса непрерывного литья были получены зависимости изменения угла затвердевания  $\varphi_s$  от времени работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов для сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия. На рисунке 2.5 приведен общий график, отображающий изменение угла затвердевания трех исследуемых сплавов.

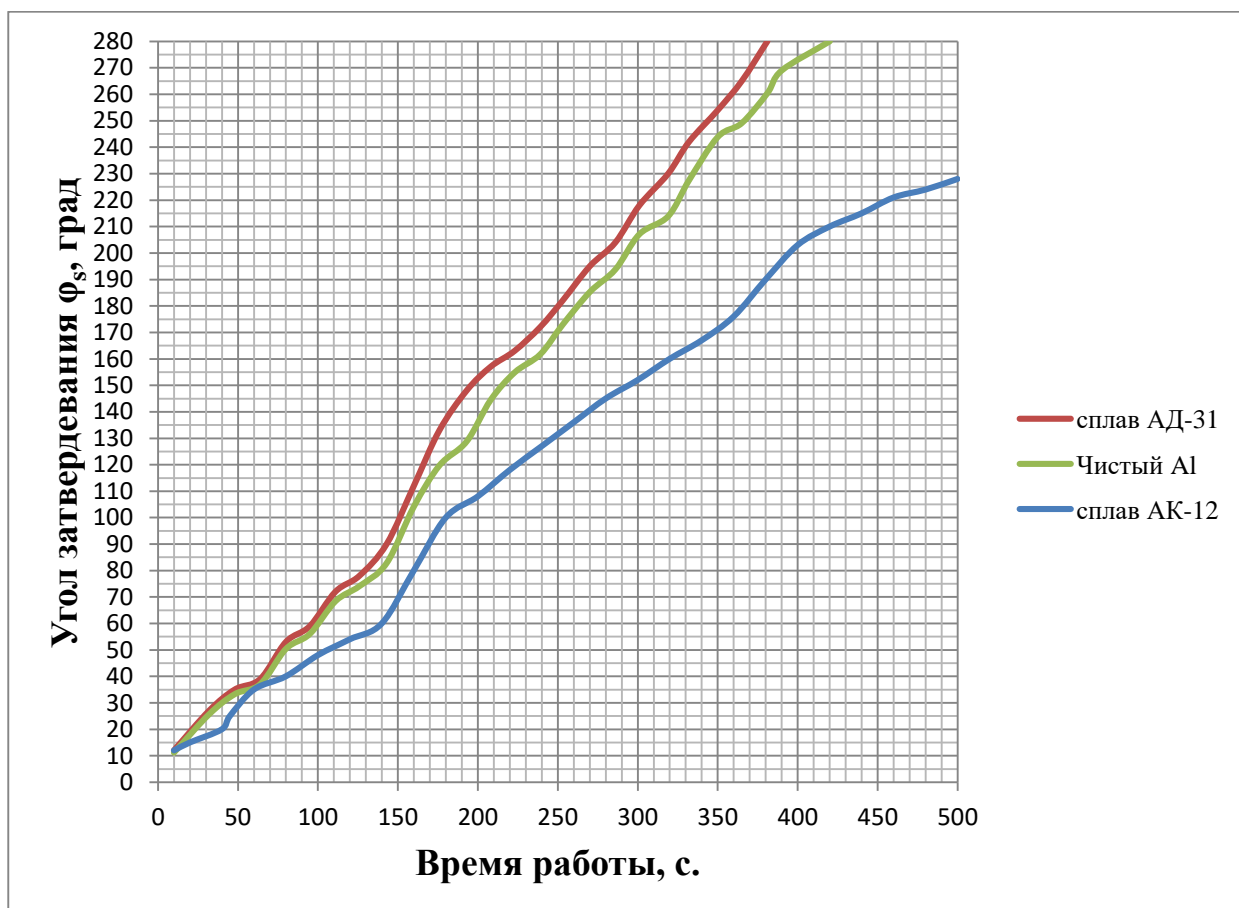


Рисунок 2.5 – Общий график изменения угла затвердевания исследуемых расплавов  $\varphi_s$  в переходном тепловом режиме работы установки

Как видно из рисунка 2.5, кривая затвердевания сплава АК-12 находится ниже кривых затвердевания остальных исследуемых металлов. Данное явление обуславливается меньшей теплопроводностью сплава АК-12 по сравнению с иными сплавами, а также тем, что температура «солидуса» сплава АК-12 существенно ниже относительно остальных расплавов.

В ходе анализа полученных зависимостей на рисунке 9, установлено, что кривые затвердевания сплава АД-31 и чистого алюминия имеют схожий характер изменения угла затвердевания. Кривая затвердевания сплава АД-31 имеет более крутой характер, поскольку сплав АД-31 имеет длительный фазовый переход от температуры «ликвидуса» до температуры «солидуса» относительно чистого алюминия, фазовый переход которого протекает при одной температуре 660 °С. Поэтому при кристаллизации сплава АД-31 выделяется большее количество тепла при фазовом переходе.

## **2.4 Выводы по главе 2**

Поскольку в настоящее время теория работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов изучена недостаточно, необходимо использовать современные методы расчета, а также компьютерное моделирование с целью описания и исследования работы указанной установки.

Для исследования тепловой работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов в переходном режиме было проведено компьютерное моделирование процесса кристаллизации расплава в программном комплексе Ansys CFX.

В результате компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys CFX была создана модель непрерывного литья алюминия и алюминиевых сплавов.

В результате компьютерного моделирования было определено распределение температуры в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов в процессе кристаллизации, также на основе данной модели были получены зависимости изменения угла затвердевания  $\varphi_s$  от времени работы установки непрерывного литья и прессования для сплава АК-12, сплава АД-31 и чистого алюминия.



### **3. Экспериментальное исследование установки непрерывного литья и прессования цветных металлов**

#### **3.1 Описание и порядок проведения эксперимента**

Экспериментальное исследование проводилось на сплавах марки АК-12, АД-31 и чистого алюминия.

Подготовительный этап проводимого эксперимента состоит из следующих стадий:

1. Демонтаж дугообразного сегмента с матрицей и замена его на плуг (для исследования изменения дуги кристаллизации расплава).

2. Очистка от грязи, пыли и остатков металла с предыдущих запусков с поверхности кристаллизатора.

3. Размещение тиглей с алюминиевым сплавом, дозатора и подставки для разогрева до температуры 750 °С в печи электросопротивления.

4. Выдерживание алюминиевого сплава в печи в течение 5÷6 минут по достижению необходимой температуры.

5. Установка разогретых деталей установки в рабочее положение, чтобы не допустить замерзания расплава в начальный момент работы установки.

6. Холостой пуск установки, чтобы определить правильность установки подставки и направления вращения кристаллизатора.

Эксперимент проводился следующим образом: После холостого пуска установки, убедившись в правильности сборки, тигель с расплавом извлекают из плавильной печи, очищают от шлака, замеряется его температура. Включается вращение кристаллизатора (скорость вращения составляет 2 об/мин). Далее расплавленный металл заливается в разогретый тигель с дозатором, установленный на подставке. Расплав через дозатор заполняет канавку колеса-кристаллизатора. По мере его движения расплав кристаллизуется, затвердевшая часть упирается в плуг и выходит из канавки. Контактной термопарой промерялась температура от места заливки и до места

выхода металла из канавки, после чего термопара снова устанавливалась в месте заливки. Температура заливаемого расплава составляла  $750^{\circ}\text{C}$ , тигель с дозатором и подставкой  $742\text{-}746^{\circ}\text{C}$  (в разных сериях экспериментов), колесо-кристаллизатор и плуг предварительно не нагревались. Фиксация температуры производилась каждую секунду.

### 3.2 Результаты экспериментального исследования

Результаты экспериментального исследования работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов представлены на рисунке 3.1 для сплава АК-12, на рисунке 3.2 для сплава АД-31, и на рисунке 3.3 для чистого алюминия.

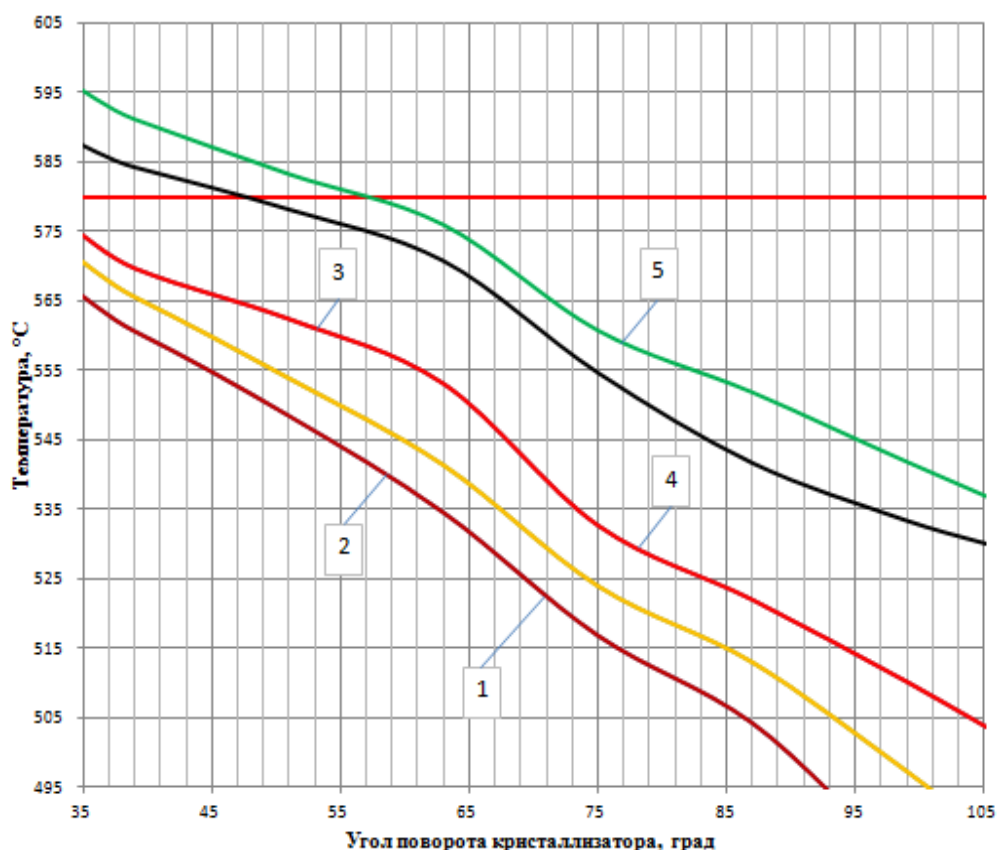


Рисунок 3.1 – Изменение температуры обрабатываемого металла в процессе кристаллизации расплава АК-12 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

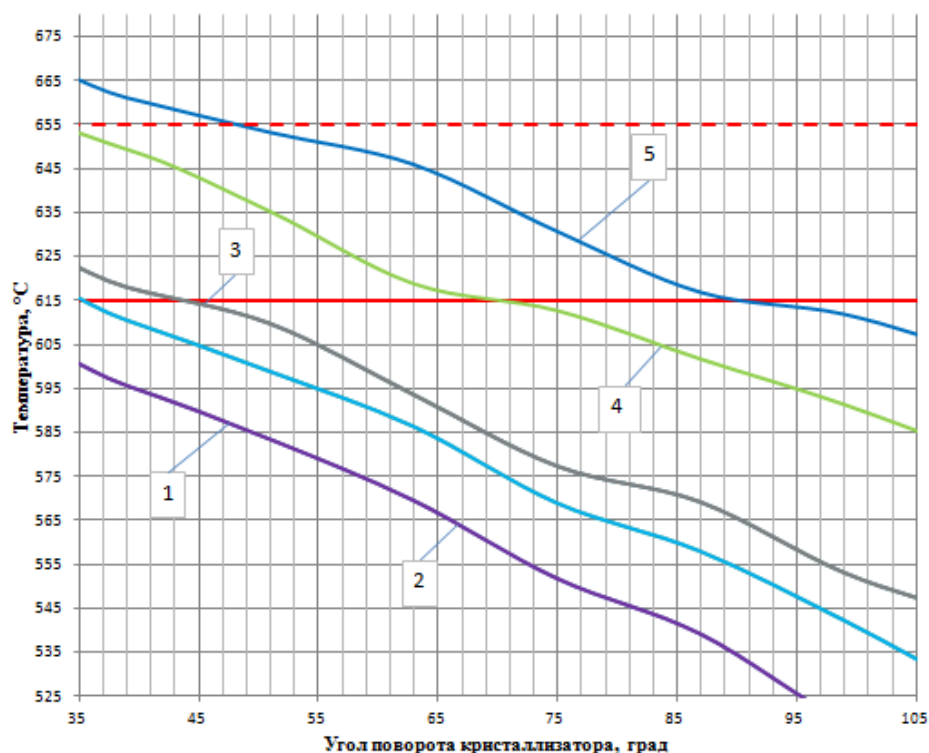


Рисунок 3.2 – Изменение температуры обрабатываемого металла в процессе кристаллизации расплава АД-31 при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

На рисунке 3.1 изображены кривые отображающие зависимости температуры обрабатываемого металла от угла поворота кристаллизатора с расплавом.

На графике чётко прослеживается изменение длины дуги кристаллизации расплава. С каждым оборотом установки кривые изменяют свой угол наклона в сторону горизонтальной прямой.

Красной линией на графиках отмечены температуры «солидуса» для исследуемых сплавов. Штрих-пунктирной красной линией для сплава АД-31 обозначена линия «ликвидус». Выше этой линии расплав находится в жидкой фазе. Каждые две линии соответствуют одному обороту кристаллизатора. На графиках изображены результаты эксперимента 5 оборотов установки (1-ый, 3-ий, 5-ый, 7-ой, 9-ый обороты из 9 оборотов установки).

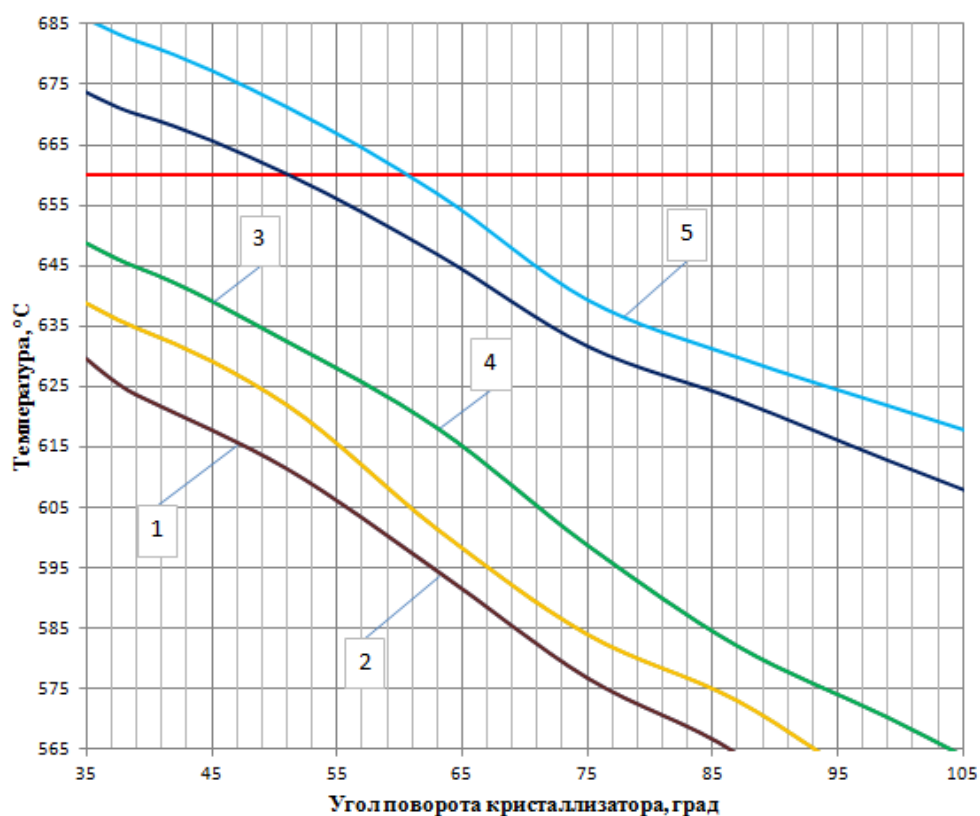


Рисунок 3.3 – Изменение температуры обрабатываемого металла в процессе кристаллизации расплава чистого алюминия при различном угле поворота кристаллизатора: линии 1, 2, 3, 4 и 5 – соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 оборотов кристаллизатора

Эксперимент проводился в течение 4,5 минут. Время эксперимента было ограничено объёмом расплавленного металла. Прослеживается связь изменения длины дуги кристаллизации расплава от времени работы установки.

Как видно из графиков в начальный момент времени, после запуска установки, при взаимодействии с холодным кристаллизатором, расплав мгновенно кристаллизовался.

Первые кривые, при отсчёте снизу, лежат ниже линии «солидуса». Связано это с тем, что при контакте расплавленного металла, выливаемого из дозатора, с холодным кристаллизатором расплав мгновенно кристаллизуется. Поэтому в начальный момент работы установки угол затвердевания  $\varphi_s$  имеет небольшие значения. С каждым оборотом кристаллизатора, по мере его нагрева  $\varphi_s$  увеличивается.

### **3.3 Сравнение результатов экспериментального исследования с компьютерным расчетом**

Проанализировав полученные результаты эксперимента и сравнив их с расчётным исследованием на компьютерной модели, прослеживалось удовлетворительное качественное и количественное совпадение температурных зависимостей, что подтверждает адекватность модели непрерывного литья цветных металлов.

Для сплава АК-12 в ходе эксперимента спустя  $\tau=75$  секунд работы установки угол  $\varphi_s=33^\circ$ , при  $\tau=155$  секунд  $\varphi_s=57^\circ$ , при  $\tau=218$  секунд  $\varphi_s=97^\circ$ . При моделировании в том же временном интервале  $\varphi_s=40^\circ$ ,  $\varphi_s=74^\circ$ , и  $\varphi_s=116^\circ$ .

Для сплава АД-31 в ходе эксперимента спустя  $\tau=75$  секунд работы установки угол  $\varphi_s=48^\circ$ , при  $\tau=155$  секунд  $\varphi_s=95^\circ$ , при  $\tau=218$  секунд  $\varphi_s=157^\circ$ . При моделировании в том же временном интервале  $\varphi_s=51^\circ$ ,  $\varphi_s=106^\circ$ , и  $\varphi_s=161^\circ$ .

Для чистого алюминия в ходе эксперимента спустя  $\tau=75$  секунд работы установки угол  $\varphi_s=33^\circ$ , при  $\tau=155$  секунд  $\varphi_s=73^\circ$ , при  $\tau=218$  секунд  $\varphi_s=117^\circ$ . При моделировании в том же временном интервале  $\varphi_s=48^\circ$ ,  $\varphi_s=95^\circ$ , и  $\varphi_s=152^\circ$ .

Расхождения в изменении угла затвердевания  $\varphi_s$  между экспериментом и расчётом главным образом связаны с тем, что при расчётном исследовании необходимая температура «солидуса» определялась во всем сечении кристаллизующегося металла, а не в одной точке, как это происходило при замере температуры термопарой в эксперименте.

### **3.4. Выводы по главе 3**

Для подтверждения результатов расчета компьютерной модели было проведено экспериментальное исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования цветных металлов в процессе кристаллизации.

В результате проведенных экспериментов для сплавов АК-12, АД-31 и чистого алюминия была определена зависимость изменения температуры обрабатываемого металла от угла поворота кристаллизатора установки.

Сравнительный анализ полученных результатов экспериментального исследования и компьютерного моделирования показал удовлетворительное качественное и количественное совпадение температурных зависимостей, что подтверждает адекватность модели непрерывного литья цветных металлов.

На основании полученных зависимостей был разработан патент на «Устройство управления тепловым режимом установки непрерывного литья и прессования цветных металлов и сплавов». Данное устройство при совместной работе с водяной системой охлаждения позволяет вывести установку на стационарный тепловой режим работы без нарушения технологического процесса.

## **4. Разработка системы охлаждения элементов установки непрерывного литья и прессования цветных металлов**

### **4.1 Анализ существующих систем охлаждения установок непрерывного литья и прессования цветных металлов**

#### **4.1.1 Система охлаждения водой**

С целью повышения эксплуатационной надежности установки разработана система принудительного водяного охлаждения ее элементов, учитывающая особенности технологического процесса. Предложена следующая конструктивная модификация установки:

- на поверхности дугообразного сегмента устанавливается змеевик-теплообменник из стали толщиной 1 мм, обеспечивающий требуемый температурный режим дугообразного сегмента и алюминиевого прутка на выходе из матрицы (рисунок 4.1);

- в корпусе рядом с подшипниками располагаются кольцевые профилированные каналы (шириной 5 мм, высотой 10 мм) из стали толщиной 1 мм, обеспечивающие необходимый температурный режим корпуса и системы вращения установки;

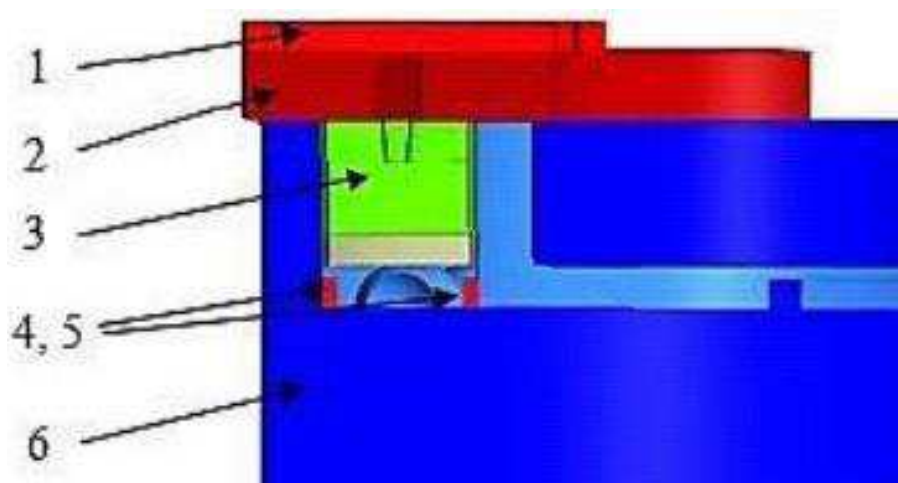
- между кристаллизатором и подшипниками устанавливается изоляционная прослойка из оксидной керамики толщиной 10 мм. [39]

#### **Выводы**

1. Предложена конструкция двухзонной водяной системы охлаждения установки НЛиП с горизонтальным карусельным кристаллизатором, характеризующаяся различной интенсивностью отвода теплоты от ее элементов, состоящая из змеевика, расположенного на дугообразном сегменте, и кольцевых профилированных каналов в корпусе.

2. Усовершенствована компьютерная модель установки НЛиП, учитывающая конструкцию и расположение системы охлаждения, физические свойства и параметры применяемого хладагента.

3. В результате численных исследований получены количественные зависимости, позволяющие определить рациональный режим отвода теплоты водяной системой охлаждения от элементов установки и место расположения дозатора, обеспечивающие стабилизацию температурного режима при литье-прессовании алюминиевого сплава АК-12 в нестационарных и установившихся условиях эксплуатации.



1 – змеевик-теплообменник; 2 – дугообразный сегмент с матрицей; 3 – кристаллизатор;  
4, 5 – кольцевые профилированные каналы; 6 – корпус

Рисунок 4.1 – Система охлаждения дугообразного сегмента

Недостатки:

1. Снижение надежности управления тепловым режимом процесса непрерывного литья и прессования в связи со значительной сложностью и многокомпонентностью конструкции предложенной схемы охлаждения установки.



2. Возможность окисления зеркала расплава металла, подаваемого в канавку кристаллизатора.

3. Ограничения по использованию для сплавов с высокой температурой плавления [35].

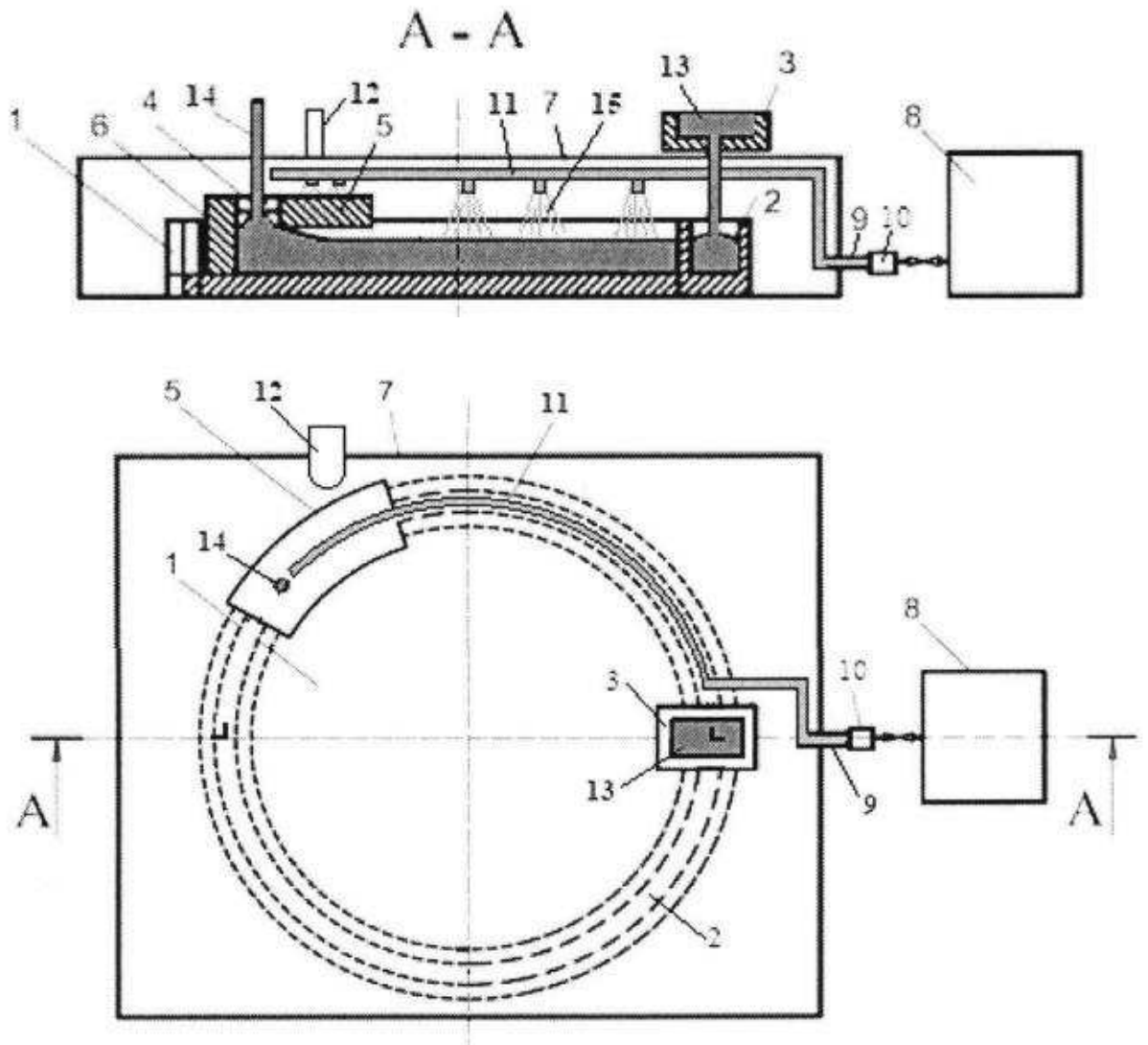
#### **4.1.2 Система с органическим хладагентом**

На базе установки непрерывного литья и прессования методом Конформ в настоящей работе был использован более усовершенствованный аппарат [35].

Конструктивные особенности устройства по сравнению с прототипом заключаются введением в систему охлаждения устройства подачи газа, получаемого из сжиженного хладагента и распределительного коллектора, а также снабжение установки защитным корпусом, который позволяет совместить охлаждение и защиту колеса-кристаллизатора с находящимся в ней металлическим расплавом от воздействия атмосферного воздуха. Воздействие газообразного хладагента непосредственно на наружные поверхности установки непрерывного литья и прессования и металлической заготовки способствует повышению эффективности их охлаждения и дает возможность получения пресс-изделий из сплавов с высокой температурой плавления. Сущность изобретения поясняется графическими материалами. На рисунке 4.2 представлена схема работы устройства.

Установка работает следующим образом: через дозатор 3, металлический расплав 13 поступает в кольцевую канавку 2 вращающегося колеса-кристаллизатора 1, по ходу движения которого затвердевает и поступает в камеру прессования, образованную сопряжением канавки 2 с дугообразным неподвижным сегментом 5, достигая выступа 6, в результате движущийся слиток за счет активных сил трения распрессовывается по сечению камеры и выдавливается в отверстие матрицы 4, образуя на выходе готовое пресс-изделие 14, В пространство защитного корпуса 7 из устройства подачи газа, получаемого из сжиженного хладагента 8, снабженного регулятором давления

10, позволяющего автоматически поддерживать предварительно заданное избыточное давление и обеспечить постоянную подачу газообразного хладагента 15, через патрубок 9 в распределительный коллектор 11, к элементам установки 4 колесу кристаллизатору 1, дугообразному сегменту 5 и в том числе к металлическому расплаву 13. Нагретый хладагент отводится через выпускной патрубок 12.



1 – кристаллизатор; 2 – кольцевая канавка 3 – дозатор подачи жидкого металла; 4 – матрица; 5 – дугообразный сегмент; 6 – выступ; 7 – защитный корпус; 8 – устройство подачи газа, получаемого из сжиженного хладагента; 9 – патрубок; 10 – клапан регулирования давления, 11 – распределительный коллектор; 12 – выпускной патрубок.

Рисунок 4.2 – Схема установки непрерывного литья и прессования методом Конформ

Технический результат заключается в воздействии газообразного хладагента непосредственно на наружные поверхности установки непрерывного литья и прессования и металлической заготовки, что способствует повышению эффективности их охлаждения и дает возможность получения пресс-изделий из сплавов с высокой температурой плавления.

Анализируя два подобных аппарата для непрерывного литья и прессования с водяным и газовым охлаждением видно, что наиболее пригодна для промышленного применения вторая установка, ввиду ее больших эксплуатационных достоинств, упомянутых выше.

Данное устройство, заслуживает особого внимания, так как в нем сочетаются основные цели энергосбережения, поставленные мной для исследования вопросов охлаждения наиболее теплонапряженных узлов установок непрерывного литья и прессования.

#### **4.2 Разработка энергосберегающей системы охлаждения установки**

Предлагаемая система охлаждения основана на преимуществах органического цикла Ренкина (ОЦР) при наличии низкопотенциальных источников теплоты, получаемых в каком-либо теплотехнологическом процессе. В цикле Ренкина в качестве рабочего тела используется не водяной пар, а органический теплоноситель. Отметим, что идея использования органической жидкости впервые была предложена еще в далеком 1823 году.

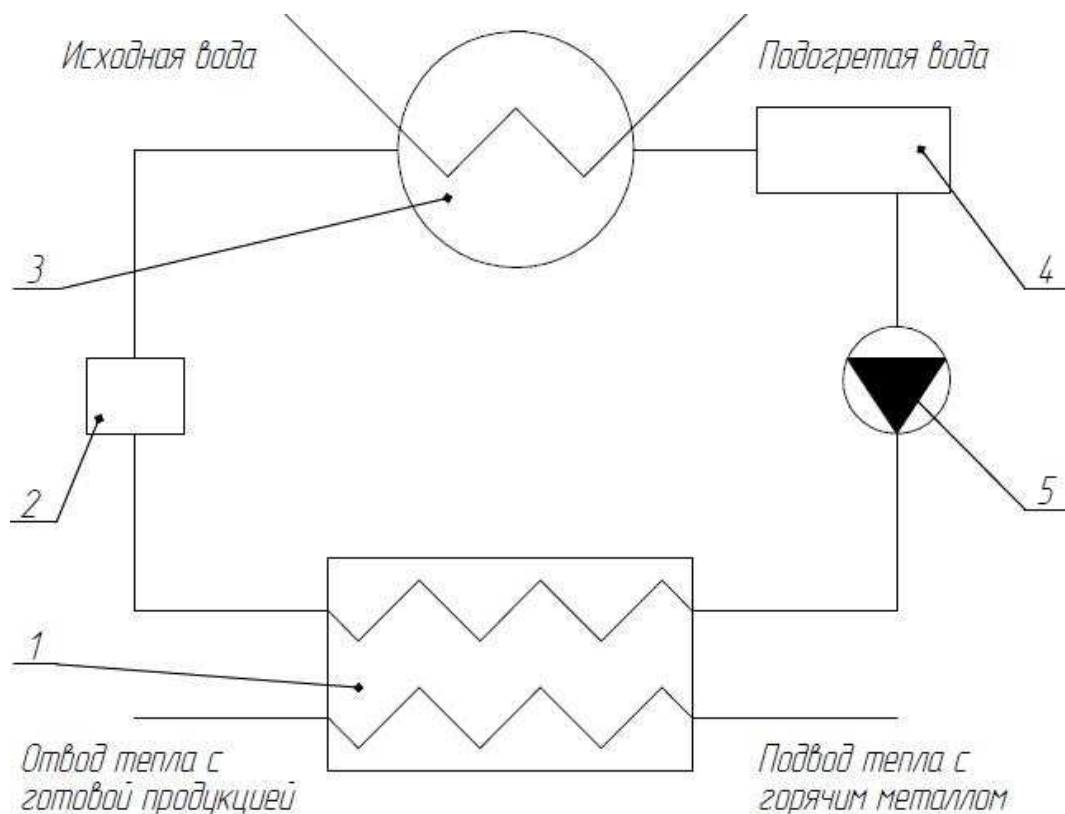
В ходе протекания цикла, в отличие от системы охлаждения на рисунке 4.2, (п.4.1.2) низкокипящая органическая рабочая жидкость забирает теплоту от источника в испарителе, в результате рабочее тело испаряется. В классическом цикле пары рабочей жидкости после испарителя направляются в расширитель. Пары при более низком давлении из выпускного отверстия расширителя направляются в конденсатор, где конденсируются. Наконец, жидкое рабочее тело с помощью насоса направляется обратно в испаритель, и процесс снова повторяется.

Хотя стоимость обычного парового цикла Ренкина ниже, чем у ОЦР способность ОЦР работать при низкой температуре утилизируемого тепла делает его лучшей технологией для использования низко потенциальных источников теплоты. Еще одно важное преимущество ОЦР над обычным циклом Ренкина это тип рабочего тела, органические жидкости, имеют более низкую температуру испарения, чем у воды, высокую степень перегрева от источника теплоты, а также после процесса расширения находятся в зоне перегретого пара.

Система охлаждения элементов установки непрерывного литья и прессования цветных металлов с использованием вторичного тепла представляет собой доработанную установку охлаждения газообразным хладагентом.

Процесс охлаждения элементов установки (рисунок 4.3) происходит за счет хладагента (фреона), подаваемого циркуляционным насосом в виде жидкости с низкой температурой под давлением. В установке НЛиП 1 хладагент вбирая в себя тепло испаряется, после чего нагретый газообразный хладагент выходит из установки, газ проходит через сепаратор 2 и поступает в теплообменный аппарат 3, где конденсируется. После конденсатора охлажденный жидкий хладагент поступает в ресивер 4 откуда насосом 5 опять подается в установку.

Для повышения надежности и безопасности работы установки в нее введены два дополнительных элемента сепаратор и ресивер, как бак запаса рабочего тела для пуска и останова, а также элементом, через который производится заполнение установки. В качестве ресивера используется гидроаккумулятор. Сепаратор добавляется в установку для удаления жидкой фазы из паров фреона после испарителя, при этом увеличивается срок службы всех узлов и агрегатов установки.



1 – установка НЛиП (испаритель); 2 – сепаратор; 3 – конденсатор (теплообменный аппарат);  
4 – ресивер; 5 – циркуляционный насос

Рисунок 4.3 – Технологическая схема охлаждения установки непрерывного литья и прессования

Консольный насос «Pedrollo NGA» служит для циркуляции рабочего тела и для создания его давления перед входом в испаритель.

Таким образом, испарителем является установка непрерывного литья и прессования в которую подводится тепло в виде расплавленного металла и отводится испаряющимся в ходе теплообмена фреоном. При этом теплообмен протекает в кожухотрубном теплообменном аппарате, где газообразное рабочее тело проходит через кожух и, отдавая тепло циркулирующей через металлический змеевик проточной воде, сжижается и выводится в виде конденсата. Нагретая в процессе теплообмена вода может быть использована,

например, для удовлетворения заводских бытовых потребностей, подсушки или предварительного подогрева в установке НЛиП металлического расплава.

Как видно, в отличие от классического цикла Ренкина, предлагаемая система охлаждения не предусматривает установку расширителя, т.е. возможности превращения потенциальной энергии газообразного хладагена также и в механическую энергию.

### **4.3 Расчет и выбор оборудования для системы охлаждения**

#### **4.3.1 Выбор рабочего тела для охлаждения**

Наибольшей эффективностью обладают рабочие жидкости с положительной пограничной кривой («сухие» жидкости), которые после расширения имеют степень сухости равную единице. Для рассматриваемого источника теплоты был произведен подбор рабочего тела и температуры испарения. Отметим, что от температуры насыщения зависит полнота утилизации.

Для подбора рабочего тела используем предложенный в работе [23] определитель ОНР. ОНР – это всеобъемлющий показатель производительности системы с учетом всех важных параметров ОЦР. Он одновременно учитывает характеристики рабочего тела и условия работы.

Результаты расчет параметров утилизации трех рабочих жидкостей с массовым расходом 1 кг/с, для температуры источника теплоты 120 °С и температуры конденсации 30 °С, проведенные по методике [23], представлены в таблице 4.1. Из таблицы следует, что три рабочих тела имеют положительный ОНР. Так, например, ОНР становится положительным при температуре испарения 90 °С для фреона R142b. Для выбора рабочего тела эти три фреона проанализированы по экономическим и экологическим показателям (таблица 4.2) Видно, что наиболее оптимальным рабочим телом для данных условий является фреон R142b с температурой насыщения 92 °С.

Таблица 4.1.- Расчет параметров утилизации рассмотренных рабочих тел при температуре испарения 90 °С

Марка рабочего тела	$T_{\text{исп}},$ °С	$\Delta h, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$r, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	ОПР	$q_{\text{ув}},$ кВт/кг	$P,$ кВт/кг	$Q_{\text{max}}, \%$
R142b	90	191,25	61,13	0,2	293,3	31,4	100
R12	90	181,44	69,68	0,1	293,3	29,3	100
R245fa	90	180,2	61,13	0,2	293,3	30,8	100

Таблица 4.2 – Экологические и энергетические характеристики рабочих жидкостей с наилучшими показателями

Показатель	R142b	R12	R245fa
Химическая формула	Дифторхлорэтан $\text{C}_2\text{F}_2\text{ClH}_3$	Дифтордихлорматан $\text{CF}_2\text{Cl}_2$	Гидрофторуглерод HFC
Озон разрушающий потенциал (ODP)	0,065	0,9	0,082
Потенциал глобального потепления (GWP)	2000	8500	1300
Класс опасности	3	4	3
Температура самовоспламенения, °С	590	330	567
Предельная температура насыщения, °С	92	91	91
Удельная мощность при предельной температуре насыщения, кВт/кг	31,412	29,3	30,802

### **4.3.2 Выбор конденсатора**

По результатам расчета, приведенных в Приложение А, был выбран двухходовой теплообменный аппарат с характеристиками:

$H = 3$  м – длина трубок;

$D = 800$  мм – диаметром кожуха;

$d = 25 \times 2$  мм – диаметр внутренних трубок;

$F = 104$  м<sup>2</sup> – площадь теплообмена;

$n = 442$  – число трубок.

По результатам выбранного теплообменного аппарата сделан конструкторский расчет для определения размеров штуцеров и трубной решетки, а также механический расчет корпуса, фланца и крышки аппарата.

Выполнен чертеж конденсатора (Приложение Б).

### **4.3.3 Выбор циркуляционного насоса**

Для циркуляции рабочего тела в контуре системы охлаждения выбран консольный насос «Pedrollo NGA-1A».

Характеристики:

Производительность – 21 м<sup>3</sup>/ч;

Напор – 12 кгс/см<sup>2</sup>;

Мощность – 0,75 кВт;

Число оборотов – 2900 об/мин.;

Частота – 50 Гц.

## **4.4 Выводы по главе 4**

В результате диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Изучены современные способы непрерывного процесса литья и



обработки металлов давлением;

2. Проведен анализ результатов компьютерного моделирования и экспериментальных исследований процесса кристаллизации алюминиевых сплавов в установке НЛиП;

3. Разработана энергосберегающая система, использующая низкопотенциальную теплоту элементов установки НЛиПс горизонтальным кристаллизатором. Предложено организовать в установке термодинамический цикл Ренкина: охлаждение элементов НЛиП жидким хладагентом, а затем отбор вторичной теплоты у переходящего в газообразное состояние хладагента, за счет его охлаждения во внешнем теплообменном аппарате (конденсаторе).

4. Выполнен конструктивный теплотехнический расчет конденсатора при проектных режимах работы установки НЛиП, использующей в качестве органического хладагента (рабочего тела) фреон R142b. Для предложенной системы охлаждения подобрано основное оборудование.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения магистерского диссертационного исследования были получены следующие результаты:

1. Изучены современные способы непрерывного процесса литья и обработки металлов давлением;

2. Проведен анализ результатов компьютерного моделирования в программном комплексе Ansys процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов в установке НЛиП с горизонтальным кристаллизатором;

3. Для разработки энергосберегающей системы охлаждения элементов установки НЛиП проведен анализ имеющихся результатов экспериментального и расчетного исследования процесса кристаллизации алюминия и алюминиевых сплавов.

4. На основе существующей конструкции установки НЛиП и данных по распределению температуры ее элементов в процессе кристаллизации разработана энергосберегающая система, использующая низкопотенциальную теплоту элементов установки НЛиП цветных металлов. В установке организуется термодинамический цикл Ренкина: охлаждение элементов НЛиП жидким органическим хладагентом, а затем отбор вторичной теплоты у переходящего в газообразное состояние хладагента, за счет его охлаждения во внешнем теплообменном аппарате (конденсаторе).

5. Выполнен конструктивный теплотехнический расчет конденсатора при проектных режимах работы установки НЛиП. В качестве органического хладагента (рабочего тела) выбран фреон R142b. Для предложенной системы охлаждения подобрано основное оборудование.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Авдулов, А.А. Разработка технологии производства проволоки из специальных алюминиевых сплавов на основе способа литья в электромагнитный кристаллизатор и непрерывного процесса прессования способом конформ / А.А. Авдулов, Н.В. Сергеев, И.С. Гудков, В.Н. Тимофеев, Ю.В. Горохов, Ю.С. Авдулова // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. - 2017. - Т. 10, №1. - С. 85-94.
2. Агапитова, О.Ю. Совершенствование процесса гидромеханического выдавливания цветных металлов / Изв. ВУЗов. Цветная металлургия. – 2011. – № 4. – С. 50–55.
3. Баузер, М. Технология прессования металлов, пер. с немецкого / М. Баузер, М. Зауер, К. Зигерт. - М.: АЛЮСИЛ МВиТ, 2009. – 918 с.
4. Беляев, С.В. Повышение эффективности производства профилей из алюминиевых сплавов на основе управления тепловыми условиями процесса прессования / С.В. Беляев, Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, А.С. Пещанский, П.О. Широков, А.Л. Киселёв // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. - 2009. - Т. 4, - № 2. - С. 418-426.
5. Бережной, В.Л. Базовые технологии и оборудование будущего в производстве пресс-изделий / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2006. – № 1–2. – С. 52–60.
6. Бережной, В.Л. К разработке бесконтейнерного прессования для деформационного передела слитков-столбов / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2011. – № 1. – С. 73–80.
7. Бережной, В.Л. Комплексы и линии для прессования легких сплавов / В.Л. Бережной // Энциклопедия «Машиностроение», том IV – М.: Машиностроение, 2005. – С. 488–494.
8. Бережной, В.Л. Предпосылки к использованию холодного прессования на машиностроительных заводах / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. – 2009. – № 3. – С. 102–109.

9. Бережной, В.Л. Российская технология и производство пресс-изделий из алюминиевых сплавов: между прошлым и будущим / В.Л. Бережной // Технология легких сплавов. - 2004. - № 3. - С. 49-54.

10. Бережной, В.Л. Технологически многоцелевое прессование с позитивно-активным трением / В.Л. Бережной // Цветные металлы. – 2001. – № 2. – С. 41–47.

11. Горбунов, Ю.А. Опыт внедрения и перспективы применения алюминиевых сплавов при производстве и модернизации изделий транспортных систем на заводах РФ / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы-2011: сб. науч. ст. – Красноярск: Версо, 2011. – С. 546–553.

12. Горбунов, Ю.А. Состояние и перспективы развития технологий производства деформированных полуфабрикатов из алюминиевых сплавов на заводах РФ / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы-2010: сб. науч. ст. – Красноярск: Версо, 2010. – С. 656–662.

13. Горбунов, Ю.А. Состояние и проблемы развития производства алюминиевых сплавов с недендритной тиксотропной структурой и полуфабрикатов из них методами деформации в твердожидком состоянии / Ю.А. Горбунов // Цветные металлы-2011: сб. науч. ст. – Красноярск: Версо, 2011. – С. 554–560.

14. Горохов, Ю.В. Оптимизация размеров инструмента при непрерывном прессовании Конформ / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко / Свидетельство о гос. регистрации в Реестре программ для ЭВМ №2010613104 от 11.05.2010.

15. Горохов Ю.В. Основы проектирования конструктивных параметров установки непрерывного литья-прессования металлов / И.В. Солопко, И.Л. Константинов // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2009. № 3. С. 20–23.

16. Горохов, Ю.В. Основы проектирования процессов непрерывного прессования металлов: автореф. дис. ... док. техн. наук. - Красноярск: СФУ, 2013. 30 с.

17. Горохов, Ю.В. Особенности пластического течения материала заготовки в деформационной зоне при непрерывном прессовании способом

Конформ / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Суслов [и др.] // Цветные металлы. – 2010. – № 12. – С. 69–71.

18. Горохов, Ю.В. Расчет параметров деформационной зоны при непрерывном прессовании способом Конформ / Ю.В. Горохов, Н.Н. Загиров, И.Ю. Губанов // Металлы. – 2004. – № 4. – С. 113–116.

19. Горохов, Ю.В. Экспериментальная установка для совмещения непрерывного литья и прессования цветных металлов на базе карусельного кристаллизатора / Ю.В. Горохов, И.В. Солопко, В.П. Катрюк // Цветные металлы–2011: сб. науч. ст. третьего Международного конгресса. – Красноярск: ООО «Версо», 2011. – С. 579–581.

20. Грищенко, Н.А. Механические свойства алюминиевых сплавов: монография / Н.А. Грищенко, С.Б. Сидельников, И.Ю. Губанов [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. – 196 с.

21. Довженко, Н.Н. Прессование алюминиевых сплавов: моделирование и управление тепловыми условиями: монография / Н. Н. Довженко, С.В. Беляев, С.Б. Сидельников [и др.]. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2009. – 256 с.

22. Калягин, Ю.А. Тепловые процессы при непрерывной разливке стали и в оборудовании машин непрерывного литья заготовок: автореф. дис. ... док. техн. наук. - Череповец: ЧГУ, 2005. - 30 с.

23. Карабарин, Д.И. Повышение эффективности утилизации низкопотенциальной энергии теплотехнологических установок: дис....канд. техн. наук. Красноярск: СФУ, 2020. – 154 с.

24. Луговской, В.М. Горячая и холодная обработка материалов жидкостью сверхвысокого давления / В.М. Луговской, Г. Даниели // Металлург. – 2011. – № 3. – С. 65–68.

25. Лукин, С. В. Совершенствование режимов затвердевания, охлаждения и нагрева стальных слитков с использованием моделирования / С. В. Лукин, Н. И. Шестаков, Ю. В. Антонова // Металлург. - 2014. - №9. -С. 105-108.

26. Любанова, А.Ш. Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом Conform. / А.Ш. Любанова, Ю.В. Горохов,

И.В. Солопко, А.Ю. Зиборов / Оптимизация равномерности течения металла при непрерывном прессовании способом Conform. // Металлы. – 2010. – № 2. – С. 28–33.

27. Макаров Г.С. Непрерывное горизонтальное литье алюминиевых сплавов: статус и перспективы // Технология легких сплавов. 2010. № 1. С. 11-20.

28. Маркушев, М.В. Структура и свойства алюминиевого сплава 1560 после интенсивной пластической деформации угловым прессованием и прокаткой / М.В. Маркушев, М.Ю. Мурашкин // Материаловедение. – 2004. - № 8. - С. 38.

29. Моделирование процесса совмещенного литья, прокатки и прессования для припойных сплавов на основе серебра С.Б. Сидельников [и др.] // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 1 (29). С. 72-75.

30. Мурашко, Р.Е. Современное состояние и тенденции развития гидростатического прессования порошков // Р.Е. Мурашко, А.Н. Курович. Р.Р. Саубанов // Тяжелое машиностроение. – 2007. – № 1. – С. 25–30.

31. Напалков, В.И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов: справочник / В.И. Напалков, Г.В. Черепок, С.В. Махов, Ю.М. Черновол. – М.: Интермет Инжиниринг, 2005. – 512 с.

32. Пат. 102550 Российская Федерация, МКП В 21 С 23/08. Установка для непрерывного литья, прокатки и прессования металла / С.В. Беляев, С.Б. Сидельников, Ю.В. Горохов [и др.]; опубл. 10.03.2011, Бюл. № 7.

33. Пат. 2100136 РФ, МКП В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья и прессования / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Ешкин А.В. – Оpubл. 27.12.1997, Бюл. № 36. – 6 с.

34. Пат. 2200644 РФ, МПК В22D11/06, В21С23/08. Устройство для непрерывного литья и прессования полых профилей / Сидельников С.Б., Довженко Н.Н., Гришечкин А.И. [и др.]. – Оpubл. 20.03.2003, Бюл. № 8. – 6 с.

35. Пат. 2736995 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Установка для непрерывного литья и прессования металлов / Горохов Ю.В., Скуратов А.П., Попиякова Н.П. [и др.]; опубл. 23.11.2020, Бюл. № 7.

36. Пат. 86513 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/08. Устройство для непрерывного прессования порошковых материалов / Горохов Ю.В., Солопко И.В.; опубл. 10.09.2009, Бюл. № 25.

37. Пат. 96041 Российская Федерация, МПК В 22 D 11/06, В 21 С 23/00. Устройство для непрерывного литья и прессования / Солопко И.В., Горохов Ю.В.; опубл. 20.07.2010, Бюл. № 20.

38. Пат. 96798 Российская Федерация, МПК В 21 С 23/08. Устройство для непрерывного прессования / Горохов Ю.В., Черкашин М.А., Крылов М.А.; опубл. 20.08.2010. Бюл. № 23.

39. Потапенко А.С. Численное исследование теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов с водяной системой охлаждения / А.П. Скуратов, Ю.В. Горохов, Н.П. Попиякова // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 10. С. 122–130. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-10-122-130.

40. Сидельников С.Б. Инновационные совмещенные технологии при обработке металлов / Ю.В. Горохов, С.В. Беляев // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2015. Т. 8. № 2. С. 185-191.

41. Сидельников, С.Б. Комбинированные и совмещенные методы обработки цветных металлов и сплавов : монография / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Н.Н. Загиров. – М.: МАКС Пресс, 2005. – 344 с.

42. Сидельников, С.Б. Разработка проекта установки совмещенного литья и прокатки прессования / С.Б. Сидельников, Н.Н. Довженко, Р.И. Галиев [и др.] // Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2005. – С. 33–42.

43. Сидельников, С.Б. Разработка совмещенных процессов литья-прокатки-прессования и программного обеспечения их проектирования с целью

повышения эффективности производства пресс-изделий из алюминия и его сплавов: дисс. ... д-ра. техн. наук : 05.16.05 / С.Б. Сидельников; ГУЦМиЗ. – Красноярск, 2005. – 424 с.

44. Скуратов А.П. Исследование тепловой работы установки непрерывного литья и прессования алюминия в переходном режиме / А.С. Потапенко, Ю.В. Горохов // Journal of Siberian Federal University. Technique & Technologies. 2017. Vol. 10. No. 3. С. 337–345.

45. Скуратов А.П. Компьютерная модель теплообмена в установке непрерывного литья и прессования цветных металлов / А.С. Потапенко // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 8. С. 1019-1030.

46. Скуратов А. П. Компьютерное моделирование и оптимизация процесса литья слитков платины / А.П. Скуратов, Д. И. Махов, Е. А. Павлов // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. -2014. - Т. 1, №7. - С. 96-102.

47. Солопко, И.В. Расчет температурных полей при кристаллизации расплава в ручье приводного колеса при непрерывном литье-прессовании методом Конформ / И.В. Солопко, Н.Н Довженко, Н.А. Нестеров [и др.]. // Высокие технологии, исследования, промышленность.: сб. статей XI Международной науч.-прак. конф. «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности», Т.4. – 2011. Санкт-Петербург: / под ред. А.П. Кудинова. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – С. 313–319.

48. Федоров, М.В. Алюминий и алюминиевые полуфабрикаты на внутреннем рынке / М.В. Федоров // Металлоснабжение и сбыт. - 2002. – июнь – С. 86–91.

49. Щерба, В.Н. Прессование алюминиевых сплавов / В.Н. Щерба. – М.: Интернет–Инжиниринг, 2001. – 768 с.



## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Конструктивный расчет конденсатора

#### Исходные данные:

Расход газа - 15 т/час;

Начальная температура газа - 100°C;

Температура конденсата на выходе - 30°C;

Начальная температура воды - 20°C;

Конечная температура воды - 60°C;

Избыточное давление паров – 1 МПа.

#### 1. Площадь поверхности конденсирования

##### 1.1 Площадь поверхности для первой зоны

Тепловой поток при конденсации пара

$$Q = G_1 \cdot r_1 \quad (\text{A.1})$$

где  $r_1$  - удельная теплота конденсации водяного пара при  $P_{\text{гр}} = 11 \text{ кгс/см}^2$

$$r_{\text{гр}} = 2009 \text{ кДж/кг.}$$

$$Q_1 = \frac{15000}{3600} \cdot 2009 = 8370,8 \text{ Вт}$$

Тепловой поток со стороны конденсата

$$Q_2 = G_1 \cdot c_1 (t_{\text{гр}} - t_2) \quad (\text{A.2})$$

где  $c_1 = 4270 \text{ кДж/(кг·К)}$  – теплоемкость конденсата при средней температуре

$$t_{cp} = \frac{100+30}{2} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$Q_2 = \frac{1500}{3600} \cdot 4,27(100-30) = 1245,4 \text{ кВт}$$

Общее количество тепла

$$Q = Q_1 + Q_2, \tag{A.3}$$

$$Q = 8370,8 + 1245,4 = 9616,2 \text{ кВт}$$

Определение расхода охлаждаемой жидкости

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 \cdot (t_K - t_H)} \tag{A.4}$$

где  $c_2 = 4180 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  – теплоемкость вод при средней температуре

$$t_{cp2} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$G_2 = \frac{9616,2 \cdot 10^3}{4180 \cdot (60 - 20)} = 58 \text{ кг/с}$$

Определение температуры  $t_{xy}$

$$Q_1 = G_2 \cdot c_2 (t_K - t_{xy}), \tag{A.5}$$

$$t_{xy} = \frac{G_2 \cdot c_2 \cdot t_K - Q_1}{G_2 \cdot c_2} = \frac{58 \cdot 4180 \cdot 60 - 8370,8 \cdot 10^3}{58 \cdot 4180} = 25,5 \text{ }^{\circ}\text{C} \tag{A.6}$$

Определение средней разности температур для зоны конденсации

$$100 \rightarrow 100$$

$$25,5 \rightarrow 60$$

$$\Delta t_M = t_{гр} - t_2 = 100 - 60 = 40 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.7})$$

$$\Delta t_B = t_{гр} - t_1 = 100 - 25,5 = 74,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.8})$$

$$\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} = \frac{74,5}{40} = 1,86 < 2 \rightarrow \Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_B + \Delta t_M}{2} = \frac{74,5 + 40}{2} = 57,3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.9})$$

Средняя температура смеси

$$t_{cp. см} = t_{гр} - \Delta t_{cp} = 100 - 57,3 = 42,7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.10})$$

Тогда требуемая поверхность испарителя в первой зоне составит

$$F_1 = \frac{Q_1}{K_1 \cdot \Delta t_{cp}} = \frac{8370,8 \cdot 10^3}{800 \cdot 57,3} = 74,9 \text{ м}^2 \quad (\text{A.11})$$

Принимаем для конденсации газообразного фреона к воде ориентировочное значение коэффициента теплопередачи  $K_1 = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

## 1.2 Площадь поверхности для второй зоны

Определение средней разности температур для зоны охлаждения конденсата

$$100 \rightarrow 30$$

$$25,5 \leftarrow 20$$

Определение средней движущей силы и средние температуры теплоносителей

$$\Delta t_M = t_K - t_{2K} = 30 - 20 = 10 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.12})$$

$$\Delta t_B = t_{\text{гр}} - t_{2H} = 100 - 25,5 = 74,5 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.13})$$

$$\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M} = \frac{74,5}{10} = 7,5 > 2 \rightarrow \Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln(\Delta t_B / \Delta t_M)} = \frac{74,5 - 10}{\ln(74,5 / 10)} = 32,1 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{A.14})$$

Принимаем для охлаждения жидкостей ориентировочное значение коэффициента теплопередачи  $K_2 = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

Тогда требуемая поверхность испарителя в первой зоне составит

$$F_2 = \frac{Q_2}{K_2 \cdot \Delta t_{\text{cp}}} = \frac{1245,4 \cdot 10^3}{800 \cdot 32,1} = 22,8 \text{ м}^2 \quad (\text{A.15})$$

Общая поверхность теплообмена составит

$$F = F_1 + F_2 = 74,9 + 22,8 = 97,8 \text{ м}^2 \quad (\text{A.16})$$

Поверхность близкую к полученной будут иметь теплообменник с высотой труб  $H=3 \text{ м}$  диаметром кожуха  $D=800 \text{ мм}$ , число труб  $442/2=221$ ,  $F=104 \text{ м}^2$ . Диаметр труб  $25 \times 2 \text{ мм}$  (внутренний диаметр  $d_{\text{в}} = 0,021 \text{ м}$ ). Площадь для межтрубного пространства  $S_{\text{мтр}} 0,07 = \text{м}^2$ .

### 1.3 Расчет трубной решетки

Минимальный шаг между трубами  $t$  рекомендуется принимать в соответствии со следующими данными:

$$t = 1,3 \cdot d_{\text{трубы}} = 1,3 \cdot 0,025 = 0,0325 \text{ м.} \approx 32 \text{ мм.} \quad (\text{A.17})$$

где  $d_{\text{трубы}} = 25 \text{ мм.}$  – диаметр труб

Выбираем тип крепления труб – развальцовкой.

При развальцовке должно выполняться условие  $t > h$

где  $h = d_{\text{трубы}} + 5 \text{ мм.} = 25 + 5 = 30 \text{ мм.}$

$32 \text{ мм.} > 30 \text{ мм.}$ , условие выполняется.

Число рядов труб, в диагонали шестиугольника:

$$m = \sqrt{(n - 1)/3} = \sqrt{(441)/3} = 12 \text{ шт.} \quad (\text{A.18})$$

Число труб в диагонали шестиугольника:

$$b = 2 \cdot \sqrt{\frac{(n - 1)}{3} + 0,25} = 2 \cdot \sqrt{\frac{(442 - 1)}{3} + 0,25} = 24 \text{ шт.} \quad (\text{A.19})$$

## 1.4 Расчет диаметра штуцеров

### 1.4.1 Диаметр штуцера для входа-выхода воды

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_2}{\rho_2 \cdot \pi \cdot W}} \quad (\text{A.20})$$

где  $W = 2 \text{ м/с}$  - скорость потока

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 58}{992 \cdot 3,14 \cdot 2}} = 0,2 \text{ м.}$$

Принимаем 250 мм.

## 1.4.2 Диаметр штуцера для входа газообразного фреона

$$d_{1y} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\rho_y \cdot \pi \cdot W}} \quad (\text{A.21})$$

где  $W = 20$  м/с - приняли для газообразного фреона

$$d_{1\text{вх}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\rho_y \cdot \pi \cdot W}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,17}{5,52 \cdot 3,14 \cdot 20}} = 0,22 \text{ м.} \quad (\text{A.22})$$

где  $\rho_y = 5,52$  кг/м<sup>3</sup> - плотность газообразного фреона

Принимаем диаметр штуцера 250 мм.

Диаметр штуцера для выхода конденсата фреона

$$d_{1\text{вых}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\rho_2 \cdot \pi \cdot W}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,17}{887 \cdot 3,14 \cdot 1}} = 0,073 \text{ м.} \quad (\text{A.23})$$

Принимаем диаметр штуцера 100 мм.

## 1.5 Расчет на прочность

### 1.5.1 Цилиндрические обечайки

Выбираем хромникелевую сталь X18Н10Т ГОСТ 52857.1-2007

Наибольшая температура среды в аппарате  $t = 100$  °С;

Допускаемое напряжение

$$[\sigma] = \eta_{\min} \left( \frac{R_{elt}}{n_T} \text{ или } \frac{R_{p02}}{n_T}; \frac{R_{mil}}{n_B}; \frac{R_{m10}}{n_D}; \frac{R_{p10}}{n_n} \right) \quad (\text{A.24})$$

где  $R_{elt} = 202$  МПа - минимальное значение предела текучести при расчетной температуре;

$R_{p02} = 308$  МПа- минимальное значение условного предела текучести при остаточном удлинении 0,2% при расчетной температуре;

$R_{mil} = 471$  МПа - минимальное значение временного сопротивления (предела прочности) при расчетной температуре;

$R_{m10} = 202$  МПа - среднее значение предела длительной прочности за  $10^4$  часов при расчетной температуре;

$R_{p10}$  - средний 1%-ный предел ползучести за  $10^4$  часов при расчетной температуре;

$n_T' = 1,5$  - коэффициент запаса по пределу текучести;

$n_B = 2,4$  - коэффициент запаса прочности по временному сопротивлению;

$n_D = 1,5$  - коэффициент запаса по пределу длительной прочности;

$n_n = 1$  - коэффициент запаса по пределу ползучести

$$[\sigma] = \eta_{\min} \left( \frac{202}{1,5} \text{ или } \frac{308}{1,5}; \frac{471}{2,4}; \frac{202}{1,5}; \frac{169}{1} \right)$$

$$[\sigma] = 134,7 \text{ МПа}$$

Прибавка к толщинам  $s = c_1 + c_2 + c_3$

С учетом технологических факторов и степени коррозии примем прибавку 2мм.

Коэффициент прочности сварного шва, при 100% контроле сварного шва  $\varphi = 0,95$  ручная дуговая электросварка.

### 1.5.2 Расчет толщины кожуха для метрубного пространства

Расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки

$$\delta = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]} + c_k = \frac{1,1 \cdot 0,8}{2 \cdot 0,95 \cdot 134,7} + 2 \cdot 10^{-3} = 5,5 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{A.25})$$

Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки  $\delta = 6$  мм.

Проверка

$$\frac{\delta - c_k}{D} = \frac{(6-1) \cdot 10^{-3}}{0,8} = 0,0063 < 0,1 \text{ условие соблюдается} \quad (\text{A.26})$$

Допускаемое давление

$$[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_k)}{D + \delta - c_k} = \frac{2 \cdot 0,95 \cdot 134,7 \cdot (6-1) \cdot 10^{-3}}{0,8 + (6-1) \cdot 10^{-3}} = 1,26 \text{ МПа} \quad (\text{A.27})$$

$$p/[p] = 1,1 / 1,26 = 0,88 < 1 \text{ условие соблюдается} \quad (\text{A.28})$$

### 1.5.3 Расчет толщины для трубного пространства

Расчетная толщина стенки цилиндрической обечайки

$$\delta = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]} + c_k = \frac{0,4 \cdot 0,021}{2 \cdot 0,95 \cdot 134,7} + 1 \cdot 10^{-3} = 1,03 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{A.29})$$

Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки  $\delta = 2$  мм.



Проверка

$$\frac{\delta - c_k}{D} = \frac{(2-1) \cdot 10^{-3}}{0,021} = 0,047 < 0,1 \text{ условие соблюдается} \quad (\text{A.30})$$

Допускаемое давление

$$[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_k)}{D + \delta - c_k} = \frac{2 \cdot 0,95 \cdot 134,7 \cdot (2-1) \cdot 10^{-3}}{0,021 + (2-1) \cdot 10^{-3}} = 11,6 \text{ МПа} \quad (\text{A.31})$$

$$p/[p] = 0,4 / 11,6 = 0,034 < 1 \text{ условие соблюдается} \quad (\text{A.32})$$

#### 1.5.4 Расчет эллиптических днищ

Коэффициент ослабления днища отверстиями

$$\varphi_0 = \frac{D - d_0}{D} = \frac{0,8 - 0,25}{0,8} = 0,69 \quad (\text{A.33})$$

Если  $\varphi_0 < \varphi_{ш}$ , то  $\varphi_0 = \varphi = 0,75$

Рабочая толщина стенки крышки (днища)

$$[\sigma]/p = 148 / 0,101 = 1461 > 25 \text{ условие соблюдается} \quad (\text{A.34})$$

$$\delta = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]} + c_k = \frac{0,4 \cdot 0,8}{2 \cdot 0,75 \cdot 134,7} + 2 \cdot 10^{-3} = 3,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.} \quad (\text{A.35})$$

Исполнительная толщина стенки цилиндрической обечайки  $\delta = 4$  мм.

Проверка

$$\frac{\delta - c_k}{D} = \frac{(4-1) \cdot 10^{-3}}{0,8} = 0,0038 < 0,1 \text{ условие соблюдается} \quad (\text{A.36})$$

Допускаемое давление

$$[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_k)}{D + 0,5 \cdot (\delta - c_k)} = \frac{2 \cdot 0,75 \cdot 134,7 \cdot (4-1) \cdot 10^{-3}}{0,8 + 0,5 \cdot (4-1) \cdot 10^{-3}} = 0,63 \text{ МПа} \quad (\text{A.37})$$

$$p/[p] = 0,4 / 0,63 = 0,63 < 1 \text{ условие соблюдается} \quad (\text{A.38})$$

### 1.5.5 Расчет фланцевого соединения

Фланцевые соединения применяют для разъёмного соединения составных частей корпусов и крышек. На фланцах присоединяют к аппаратам трубы, арматуру.

Выбираем подходящий фланец

(Исполнение 1 - с гладкой уплотнительной поверхностью.)

$D_{\text{вн}} = 800 \text{ мм.}$	$D_{\text{б}} = 895 \text{ мм.}$	$S = 12 \text{ мм.}$
$P = 0,4 \text{ МПа}$	$D_{\text{ср}} = 857 \text{ мм.}$	$d = 22 \text{ мм.}$
$D_{\text{ф}} = 835 \text{ мм.}$	$h = 24 \text{ мм.}$	$Z = 40$

Условное обозначение: Фланец 1-800 – 0,5 ГОСТ 28759.2-90

$d = 23 \text{ мм.}$  – диаметр отверстия под болтовое соединение;

$d_{\text{б}} = \text{M20}$  – диаметр болта.

Материал для болта Сталь 3

Так как фланец исполнения 1 - с гладкой уплотнительной поверхностью, то для него выбирают прокладку по табл.

В исполнении 1 – для фланцев с гладкой уплотнительной поверхностью  
по:

$D_{вн} = 800$ мм.	$d_n = 829$ мм.
$D_n = 859$ мм.	$h_n = 2$ мм.

Условное обозначение: Прокладка 1 - 800 – 06 ОСТ 26 – 430 – 79

Фланцы и прокладки, подобранные по стандартам, в расчете не  
нуждаются.

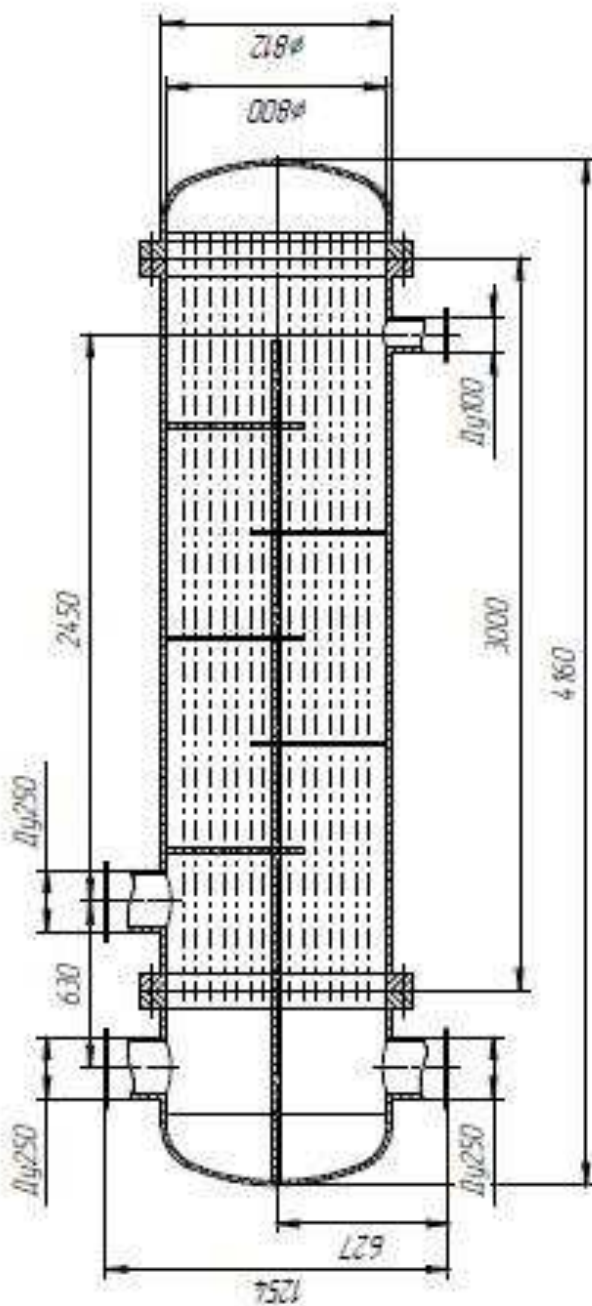
## 1.6 Заключение

По результатам расчета был выбран двухходовой теплообменник с характеристиками:  $H = 3$  м, диаметром кожуха  $D = 800$  мм;  $F = 104$  м<sup>2</sup>,  $n = 442$ .

По результатам выбранного теплообменника сделан конструкторский расчет для определения размеров штуцеров и трубной решетки, а также механический расчет корпуса, фланца и крышки аппарата.

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Горизонтальный, двухходовой конденсатор



№ инв.	№ докум.	Лист	Всего	Исполн.	Провер.	Дата	Деталь	Материал	
Теплообменный аппарат (конденсатор)								3240	
								Копировать	Формат А3

Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №
Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №	Изд. №

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический

институт

Теплотехники и гидрогазодинамики

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



В.А. Кулагин

инициалы, фамилия

« 23 » июня 2022 г.

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Разработка системы охлаждения элементов установки непрерывного литья и  
прессования цветных металлов

Тема

13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»

код и наименование направления

13.04.01.01 «Энергетика теплотехнологий»

код и наименование магистерской программы

Руководитель



подпись, дата

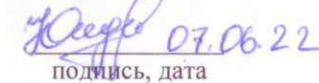
д.т.н., профессор

должность, ученая степень

А.П.Скуратов

инициалы, фамилия

Выпускник



подпись, дата

В.А.Юнусов

инициалы, фамилия

Красноярск 2022