

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Электротехники и электротехнологии

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
В.Н. Тимофеев
подпись инициалы, фамилия
« _____ » _____ 2016г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

УСТАНОВКА ФИЛЬТРАЦИИ РАСПЛАВА АЛЮМИНИЯ
ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ ОТ 20 ДО 45 ТОНН В ЧАС С
КОМБИНИРОВАННЫМ НАГРЕВОМ

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.07 Электротехнологии в металлургии

Научный руководитель	_____	доц., канд. тех. наук	<u>Е.А. Головенко</u>
подпись, дата		должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>К.А. Байкова</u>
подпись, дата			инициалы, фамилия
Рецензент	_____		<u>Е.А. Душкин</u>
подпись, дата			инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Продолжение титульного листа МД по теме установка фильтрации расплава алюминия производительностью от 20 до 45 тонн в час с комбинированным нагревом.

Нормоконтролер

подпись, дата

Первухин М.В.

инициалы, фамилия

РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация по теме «установка фильтрации расплава алюминия производительностью от 20 до 45 тонн в час с комбинированным нагревом» содержит 90 страниц текстового документа, 2 приложения, 47 иллюстраций, 5 таблиц, 60 формул, 32 использованных источников.

УСТАНОВКА ФИЛЬТРАЦИИ, АЛЮМИНИЙ, НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ, ФИЛЬТРАЦИЯ, НАГРЕВ, ПЕНОКЕРАМИЧЕСКИЙ ФИЛЬТР, КОМБИНИРОВАННЫЙ НАГРЕВ, МЕТАЛЛУРГИЯ.

Объектом исследования является установка фильтрации расплава алюминия производительностью от 20 до 45 тонн в час с комбинированным нагревом.

Цель МД – разработка компактного фильтр-бокса с пенокерамическим фильтром и комбинированным нагревом, который используется в составе плавно-литейного агрегата для механической отчистки расплава алюминия от включений с целью повышения качества сплава, эффективного как в режиме предварительного нагрева, так и в режиме литья.

В результате математического моделирования были определены тепловые поля в камере фильтрации, в частности при конвективной теплопередачи в момент прогрева ПКФ и радиационном нагреве камеры фильтрации с расплавом алюминия.

Спроектирована и внедрена промышленная установка в действующее производство, на которой были получены экспериментальные данные позволяющие оценить эффективность нагрева алюминия в процессе фильтрации.

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Применение установок фильтрации	8
1.1 Методы удаления неметаллических включений	8
1.2 Фильтрация	11
1.3 Структура открытых пор пенокерамики	13
1.4 Эффективность фильтрации расплава металла	15
1.5 Источники включений	17
1.6 Как работает фильтр	17
1.7 Свойства фильтров	22
1.8 Существующие аналоги	24
Выводы по главе	31
2 Математическое моделирование теплофизики	32
2.1 Законы конвективного теплообмена	32
2.2 Уравнения конвективного теплообмена	35
2.3 Приближение Буссинеска в задачах свободной тепловой конвекции	46
2.4 Постановка задачи и основные допущения	47
2.5 Определение размера пенокерамического фильтра	57
2.6 Результаты математического моделирования и их анализ	59
Выводы по главе	62
3 Описание промышленной установки	63
3.1 Технология фильтрации и фильтрующий бокс	63
3.2 Разработка технического проекта фильтрующего бокса	66
3.3 Автоматизация электропитания и построение АСУ ТП установки фильтрации	72
3.4 Экспериментальные данные	78
Выводы по главе	80
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	81

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	83
ПРИЛОЖЕНИЕ А Схема электрическая общая.....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Чертеж общего вида	87

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Алюминий и его сплавы применяют во многих областях промышленности, строительстве и быту. Прежде всего, алюминий и его сплавы используют авиационная и автомобильная отрасли промышленности. Широко применяется алюминий и в других отраслях промышленности: в машиностроении, электротехнической промышленности и приборостроении, промышленном и гражданском строительстве, химической промышленности, производстве предметов народного потребления.

Высокое качество металла во многом определяется низкой концентрацией неметаллических включений. Одним из эффективных способов снижения их количества является очистка расплавов пористыми фильтрами. Уменьшение концентрации твердых включений в отливке обеспечивает улучшение механических и других свойств металла.

Наряду с эффектом фильтрования, вспененные керамические фильтры улучшают текучесть расплава. Проходя через фильтр, поток металла проходит по системе разветвлённых каналов. Мелкие частицы, которые не задержались на поверхности фильтра, так как оказались слишком маленькими, продолжают движение вместе с потоком металла внутри сети каналов фильтра. В процессе фильтрации каналы фильтра постепенно зарастают, задерживая небольшие частицы включений. Благодаря этому удаётся очистить металл и от мелких частиц загрязнений содержащихся в расплаве. Это имеет большое значение, т.к. даже мельчайшие включения, обнаруженные в литых колёсных дисках, заготовках для изготовления фольги либо строительном профиле исключают их дальнейшее использование. Кроме того, было отмечено, что при прохождении через пенокерамический фильтр (ПКФ) снижается содержание растворенного в металле газа, что также положительно сказывается на дальнейших свойствах металла.

Разработка установки фильтрации с комбинированным нагревом задача актуальная, так как для прогрева ПКФ самым эффективным способом является

конвективный нагрев, а для компенсации тепловых потерь расплава в желобах и фильтрационной камере во время литья эффективнее использовать радиационный нагрев. Использование только лишь радиационного нагрева не позволит полностью по всей глубине прогреть ПКФ, а греть алюминий горячим воздухом не рекомендуется во избежание окисления.

Объектом исследования является установка фильтрации расплава алюминия производительностью от 20 до 45 тонн в час с комбинированным нагревом.

Предметом исследования являются тепловые процессы в камере фильтрации, в частности при конвективной теплопередачи в момент прогрева ПКФ и радиационном нагреве камеры фильтрации с расплавом алюминия.

Цель работы заключается в разработке компактного фильтр-бокса с пенокерамическим фильтром и комбинированным нагревом, который используется в составе плавильно-литейного агрегата для механической отчистки расплава алюминия от включений с целью повышения качества сплава, эффективного как в режиме предварительного нагрева, так и в режиме литья.

Для достижения поставленной цели необходимо решить комплекс задач:

1. Поиск существующих аналогов. Анализ преимуществ и недостатков, анализ способов их исследования, разработки путей дальнейшего совершенствования.

2. Разработка математической модели теплового поля и поля скоростей конвективного нагрева установки фильтрации. Верификация данных математического моделирования.

3. Проектирование и внедрение установки фильтрации на базе ПКФ 305x305 мм. Получение экспериментальных данных работающей установки.

Научная новизна:

1. Разработка математической модели расчета тепловых полей и поля скоростей фильтр – бокса на этапе предварительного прогрева камеры фильтрации и ПКФ конвективными нагревателями. Впервые получено тепловое

поле в камере фильтрации при комбинированном нагреве самой камеры, и установленного в ней ПКФ.

2. Сравнение эффективности нагрева одного трехфазного нагревателя с тремя однофазными.

Практическая значимость:

1. Разработана система комбинированного нагрева (конвективного на этапе разогрева пенокерамического фильтра с бетонным картриджем и радиационного на этапе протока расплава).

2. Повышена безопасность для обслуживающего персонала, более эргономична и удобна в эксплуатации.

3. Традиционная байпасная схема фильтрации меняется на более компактную проходную, что существенно сокращает габариты установки.

1 Применение установок фильтрации

1.1 Методы удаления неметаллических включений

В современном, динамично развивающемся мире нередко возникают принципиально новые, технически сложные устройства, происходит усовершенствование и усложнение уже существующих при постоянно ужесточающихся требованиях к ним, что приводит к необходимости улучшения их эксплуатационных характеристик. Интенсификация разработок технологических процессов, обеспечивающих получение качественных изделий с однородной структурой и повышенными механическими свойствами, становится весьма актуальной. Кроме того, большое внимание уделяется снижению массы деталей, что увеличивает потребительский спрос на литые заготовки из алюминиевых сплавов как в нашей стране, так и за рубежом [1].

Растущее использование алюминиевых сплавов для изготовления сложных изделий - таких, как детали самолетов, требует чрезвычайно низкой концентрации загрязнений в жидком металле. Чаще всего твердые включения представляют собой оксидные шарики в сплавах и оксидные пленки. Размер дисперсных включений составляет несколько микрон (мкм), а оксидные пленки могут достигать нескольких миллиметров [2].

Твердые включения размером порядка нескольких мкм не дают возможности достигать высокого качества обработки поверхности, а также производить детали небольшой толщины для работы в режиме высоких скоростей деформации. Поэтому необходимы эффективные методы очистки расплавленного металла, удовлетворяющие современным стандартам качества, особенно в связи с ростом использования вторичного алюминия [19].

Неметаллические включения в алюминиевых сплавах представляют собой оксиды: Al_2O_3 , MgO , $MgAl_2O_4$, SiO_2 ; карбиды: Al_4C_3 , SiC ; нитриды: AlN и бориды: SiB_2 , AlB_2 в форме частиц, пленок и агрегатов. Для удаления

неметаллических включений расплава был выбран способ фильтрации с применением пенокерамического фильтра [2; 3].

Имеются различные методы удаления неметаллических включений из расплавов металлов. Они основаны на седиментации, флотации или фильтрации.

Седиментация осуществляется при длительной обработке металла в печи. Флотация происходит в отдельных агрегатах, аналогичных небольшим печам переменного объема и емкостью в несколько тонн. В большинстве случаев эти агрегаты снабжают системой подогрева. Исключением является система MINT малого объема, которую можно опорожнить после каждого литья. Ряд агрегатов для фильтрации твердых частиц являются одноразовыми, например, керамические фильтры [4].

Пенокерамический фильтр (ПКФ) для фильтрации алюминиевых расплавов в заготовительном литье был разработан корпорацией SELEE в 1974 году. В 1980-е годы технология пенокерамической фильтрации быстро получила признание на мировом рынке. И стала широко использоваться в производстве большого ассортимента алюминиевой продукции, включая баночный прокат, литографские листы, продукцию для авиакосмической промышленности (плоский прокат, штампованные и прессованные изделия), теплообменники, фольгу, а также электропровода и электрокабель [12]. Причинами быстрого признания рынком и развития этой технологии в заготовительном литье алюминия являются:

- простота использования;
- гибкость процесса – возможность фильтровать различные марки сплавов за счет того, что оставшийся расплав в фильтрационной системе сливается после каждой плавки;
- высокая эффективность фильтрации;
- компактное инженерное воплощение – небольшая площадь, занимаемая фильтрационной системой;

– низкие переменные и эксплуатационные издержки, а так же капитальные расходы на закупку и установку оборудования.

За последние десять лет произошли значительные улучшения в технологии пенокерамической фильтрации, а именно, был улучшен дизайн и материал фильтрационных чаш, разработаны терморасширяющиеся прокладки фильтра, улучшен дизайн систем предварительного нагрева фильтра, разработаны мелкопористые фильтры, фильтрационные системы для высокоскоростного литья, двухступенчатая фильтрационная система, произошла автоматизация процесса фильтрации [2; 3; 9].

Единственным и основным элементом фильтрационной системы, не подвергнутому существенному техническому улучшению, является ПКФ, а именно, его огнеупорный материал. Первые ПКФ SELEE состояли из алюмохромовых гранул ($\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$) на алюмофосфатной связке [12]. Алюмохром в качестве основы ПКФ является относительно дорогим материалом и несёт потенциальную опасность для окружающей среды из-за возможности образования шестивалентного хрома. Несколько лет спустя, алюмохромовые гранулы были полностью заменены на гранулы оксида алюминия с добавлением огнеупорных керамических волокон. Этот материал получил название «РВА» (phosphatebondedalumina). Он широко известен в алюминиевой промышленности и является стандартным материалом для производства пенокерамических фильтров, используемых в заготовительном литье алюминия. В настоящее время почти все ПКФ (98–99 %), потребляемые в данной отрасли, выполнены из материала «РВА». ПКФ «РВА» имеет ряд недостатков, связанных с применением гранул оксида алюминия и алюмофосфата в качестве основного и связующего материалов соответственно. Гранулы оксида алюминия имеют высокие коэффициент термического расширения и модуль упругости, что оказывает негативное влияние на термостойкость ПКФ. Алюмофосфатное связующее вступает в химическую реакцию с магнием, что приводит к повышению смачиваемости фильтра расплавом, ослаблению микроструктуры ПКФ и выделению фосфина из

отработанного фильтра. ПКФ «РВА» содержит остаточные алюмофосфатные гидраты, которые могут вступать в реакцию с магнием, наводороживая расплав. Для замены общепринятых фильтров из оксида алюминия на алюмофосфатной связке был разработан новый экономически эффективный материал, состоящий из алюмосиликатной основы на связке боросиликатного стекла. Алюмосиликатные гранулы имеют низкий коэффициент термического расширения и модуль упругости, что позволило существенно улучшить термостойкость ПКФ и значительно снизить термические напряжения, образующиеся в ПКФ при нагреве. Боросиликатное связующее является химически стойким к воздействию магния и предотвращает повышение смачиваемости и ослабление ПКФ [4; 9;12].

1.2 Фильтрация

В процессах фильтрации частицы отделяются фильтрующей средой тремя различными способами, в зависимости от их размера и величины отверстий среды. На поверхности фильтрующей среды происходит просеивание, в результате которого образуется фильтровальная лепешка, состоящая из частиц, диаметр которых больше отверстий среды. Величина диаметра частиц того же порядка, что и размер отверстий, либо превышает его. Обычно таким же образом производится работа фильтров из тканых материалов. Фильтрация в глубоком слое происходит внутри зернистой или пенообразной фильтрующей среды - на ее внутренней поверхности. Частицы из расплавленного металла могут быть задержаны на внутренней поверхности каждой поры, как показано на рисунке 1.1, в этом случае размер частицы меньше, чем размер минимального отверстия - "окна". Имеется ряд причин, по которым частицы соприкасаются с внутренней макроскопической поверхностью фильтра. С. Conti (проф. Бельгийского политехнического института) принял следующий механизм расчета эффективности фильтрации алюминия.

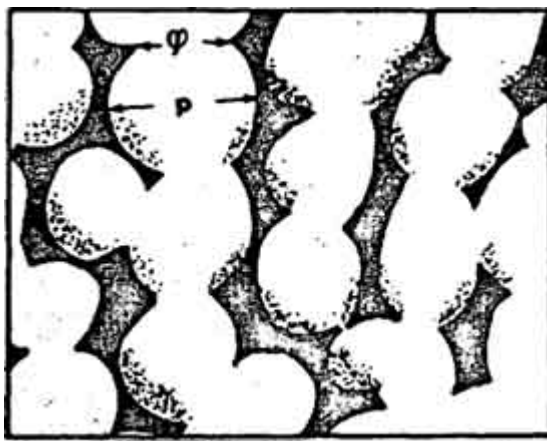


Рисунок 1.1 – Фильтрация в глубоком слое

Прямой захват. Частица ударяется о поверхность фильтра при движении по своей траектории.

Гравитационные силы. Микроскопическое движение возникает в результате бомбардировки молекулами частиц в жидкости. Этот эффект, по-видимому, имеет значение только для частиц размером менее 1 мкм.

Инерционные силы. Возникают в частицах значительного веса, которые выпадают при внезапных изменениях траектории и ударяется о внутреннюю фильтрующую поверхность [7].

Гидродинамические воздействия. Возникают вследствие различия скоростей в ячейках фильтра. В зависимости от формы частицы она вращается и перемещается в поле потока. В случае фильтрации алюминия через пенокерамику наиболее значительными силами являются прямой захват, инерционные и гидродинамические силы.

Частицы, которые коснулись внутренней фильтровальной поверхности, удерживаются на ней под действием сил Ван-дер-Ваальса. Частицы или конгломераты частиц могут быть удалены с поверхности фильтра путем повышения сдвигающих сил (в результате внезапного роста скорости потока, промывки фильтра обратной струей или колебаний прокачки, а также внезапных перемещений самой фильтрующей среды).

1.3 Структура открытых пор пенокерамики

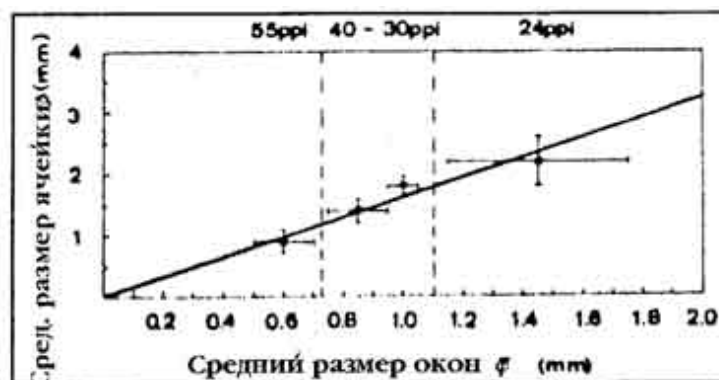


Рисунок 1.2 – Соотношение между размерами ячеек и "окон"

Информация о структуре фильтрующей среды является определяющей при анализе характеристик потока жидкости. Для характеристики микроструктуры пенокерамики были использованы методы стереологии.

Структура пенокерамики представляет собой закругленные многогранники диаметром ρ , соединенные между собой отверстиями ("окнами") диаметром φ . Ориентировочной характеристикой является число пор на один дюйм – ppr_1 . Общую пористость обозначим f , и внутреннюю поверхность ячеек – S_v . Расстояние между центрами двух ячеек – S .

Структура пенокерамики анизотропна в плоскости поверхности фильтра, ячейки сферические со средним размером ρ сферические со средним размером ρ . В направлении, перпендикулярном к поверхности фильтра, ячейки являются удлиненными с несколько большим средним размером ppr_1 . В пенокерамических фильтрах с размерами, определяющими проницаемость и параметры потока жидкости, являются средние размеры ячеек и окон. На рисунке 2 показано соотношение этих двух параметров. При значениях ppr_1 от 55 до 24 средний размер ячейки в направлении, перпендикулярном направлению потока, возрастает от 0,9 до 2,2 мм. Средний размер "окна" увеличивается от 0,6 до 1,45 мм. Общая макропористость отверстий в пенокерамике растет от 75 % (30ppr1) до 83 % (24ppr1).

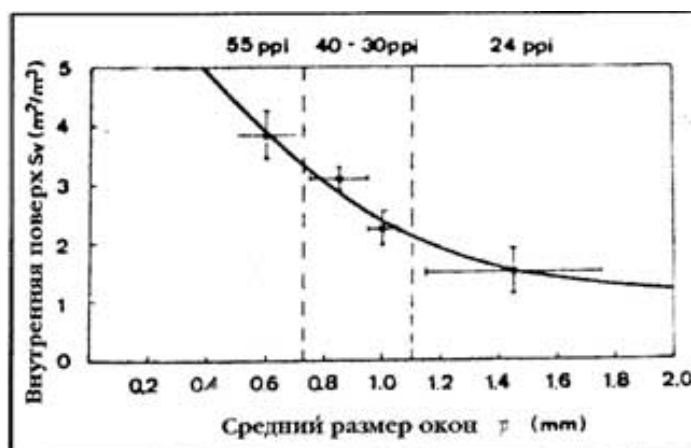


Рисунок 1.3 – Зависимость величины первичного напора металла для различных фильтров от размера «окон»

В процессе фильтрации внутренняя поверхность пор контактирует с расплавленным металлом. Из-за поверхностного натяжения расплавленного металла поры меньше, чем 0,1 мм, по-видимому, не могут быть включены в площадь внутренней поверхности, т.к. давление в жидком металле, которое обычно используют при фильтрации, не превышает давления столба алюминия высотой 500-1000 мм. На рисунке 1.3 показана величина внутренней поверхности в зависимости от среднего размера "окон". Она понижается от 0,4 до 1,0 м²/м³ для фильтров с pp_i до 24 [6; 7].

Величина эффективности фильтрации, которая составляет от 75 до 95 % для частиц размером 30 мкм, при низких скоростях расплава падает до 15-35 % при более высоких скоростях и меньших размерах частиц в соответствии с рисунком 1.4. Снижение эффективности фильтрации при увеличении скорости расплава обусловлено ростом турбулентности в зонах конвергенции ячеек, а также уменьшением вероятности седиментации при высоких скоростях расплава [21].

Эффективность фильтрации повышается с увеличением размеров частиц. На рисунке 1.4 приведены данные для плотности частиц 4,5 г/см³ и скорости расплава 1,0 см/с. Из расплава были выделены более 80% частиц всех размером

более 40 мкм. При размерах частиц порядка 30 мкм эффективность фильтрации составила от 30 до 65 % при более тонком фильтре. Если частицы тяжелее, чем жидкость, влияние седиментации становится более значительным. Соответственно в зоне конвергенции ячейки задерживается большая часть частиц. Эффективность фильтрации растет с увеличением плотности частиц. Это явление более резко выражено в случае грубых фильтров (30 ppi) и менее резко - в случае тонких (55 ppi).

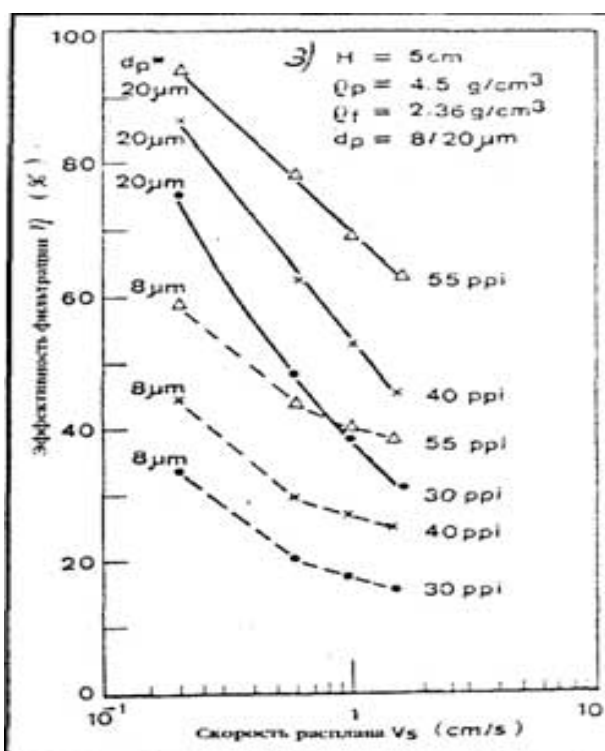


Рисунок 1.4 – Зависимость эффективности фильтрации в начале процесса от скорости расплава

1.4 Эффективность фильтрации расплава металла

За последние 20 лет технология литья и управление техпроцессом были значительно усовершенствованы. Усовершенствования процессов плавки, графитизации, модифицирования и легирования сплава, технологии контроля температуры заливки, а также методов изготовления форм и стержней фундаментально повысили и стабилизировали качество литья.

За тот же период применение технологии фильтрации продолжало развиваться:

- 1) Продолжающиеся исследования технологии фильтрации позволили добиться более эффективной и экономичной очистки расплава от включений;
- 2) Литейщики осознали, что наряду с удалением нежелательных включений из отливок, фильтрация позволяет повысить степень управления техпроцессом и производительность производства;
- 3) Повышаются стандарты качества литья;
- 4) Повышаются требования к внешнему виду литья;
- 5) Возникают требования по снижению себестоимости литья посредством сокращения брака и/или повышения выхода годного;
- 6) Тенденции по снижению веса литья приводят к необходимости получения тонкостенных отливок, более чувствительных к наличию дефектов, связанных с включениями и вторичным окислением расплава;
- 7) Рост популярности автоматической заливки приводит к повышению скорости заливки и склонности к образованию турбулентности металла и дефектов по эрозии формы;
- 8) Более частое применение программ моделирования процесса заливки и расчета литниково-питающей системы более четко определяет положительное влияние фильтрации на заполнение формы.

Использование пенокерамических фильтров продолжает расти благодаря тому, что достигаемый экономический эффект превышает затраты, связанные с их покупкой и применением.

Данный экономический эффект связан не только с сокращением брака, но также с повышением качества производства литья в целом. Если 20 лет назад фильтры применялись только в особых случаях, сегодня они являются фундаментальной частью технологии производства высококачественного автомобильного и машиностроительного литья при оптимальной себестоимости [3; 4; 6].

1.5 Источники включений

«Грязный» расплав – наиболее распространенный источник включений. Нежелательные материалы могут попадать в расплав различными путями, включая использование возврата, не прошедшего дробеструйную обработку, окисление металла при переливе и транспортировке, образование продуктов реакции при вводе легирующих элементов и прочие продукты образующиеся при металлургической обработке расплава, разрыв огнеупорной футеровки и шлак, образующийся при недостаточном обслуживании ковшей [12].

Тем не менее, часто загрязнение расплава происходит внутри формы по ходу заливки, что связано: со вторичным окислением металла за счет высокой турбулентности; с разрывом формы при высокой скорости металла и низкой прочности формы; с проблемами выделения пара и газа в форме при недостаточной вентиляции формы и или взаимодействии металла с формой.

Одним из преимуществ применения пенокерамических фильтров является возможность более точной диагностики причины брака [7].

1.6 Как работает фильтр

Одномерные продукты, такие как экструзионные (рисунок 1.5) и прессованные (рисунок 1.6) керамические фильтры, а также стальные или кремнеземные сетки очищают расплав, задерживая включения только на своей внешней поверхности, в то время как частицы размером меньше чем минимальная ячейка могут свободно попадать в отливку (рисунок 1.7).

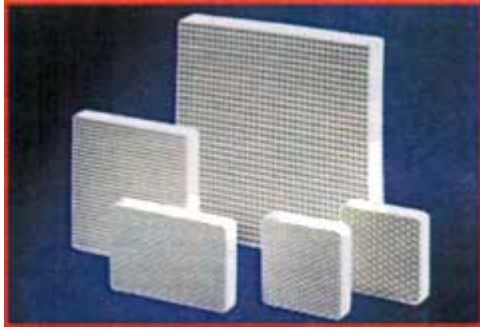


Рисунок 1.5 – Экструзионные фильтры

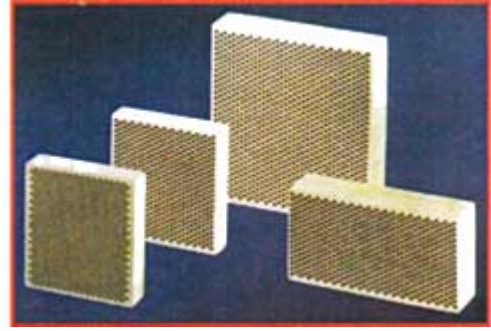


Рисунок 1.6 – Прессованные фильтры

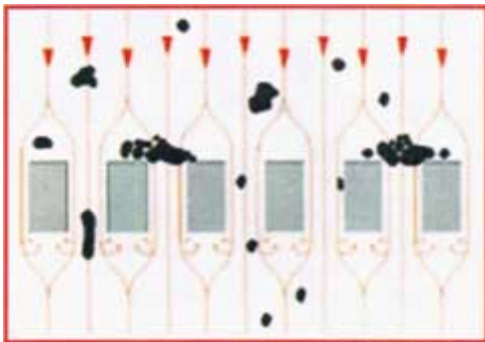


Рисунок 1.7 – Механизм работы
одномерных фильтров

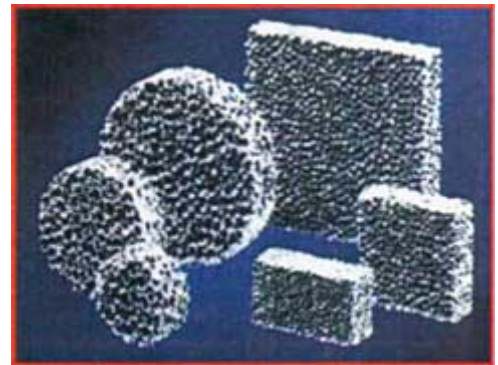


Рисунок 1.8 – Пенокерамические
фильтры

Напротив, пенокерамические фильтры (рисунок 1.8) являются многомерными. Металл должен пройти через лабиринт ходов перед тем, как он попадет в отливку.

Вначале задерживаются крупные частицы, размер которых больше диаметра пор фильтра, эти частицы оседают на поверхности (рисунок 1.9).

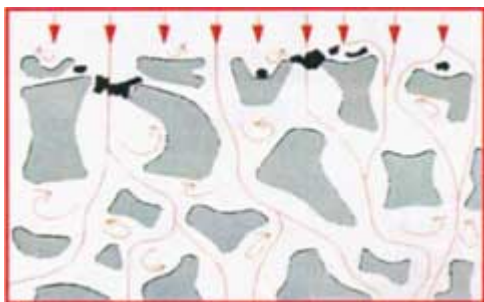


Рисунок 1.9 – Оседание частиц на поверхности



Рисунок 1.10 – Фильтрации скопившимися частицами

Включения начинают накапливаться на поверхности, образуя «пирог», который после определенного времени начинает задерживать и более мелкие частицы (рисунок 1.10).

Расплав, который проходит через «пирог» на поверхности фильтра, течет по лабиринту ходов внутри фильтра. Механизм фильтрации, свойственный для пенокерамических фильтров, основан на многочисленном изменении направления потока расплава, что приводит к снижению его скорости. В результате мелкие частицы оседают на внутренней структуре фильтра (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Фильтрация внутри фильтра

Эффективность пенокерамических фильтров по устранению типовых включений, возникающих в процессе плавки, легирования и формовки, можно проследить на рисунке 1.11. На первой фотографии – песчинки, застрявшие в порах фильтра. На второй фотографии – шлак накапливается на поверхности

фильтра. На последней фотографии можно разглядеть тонкую зону сульфидов магния по всей лицевой поверхности фильтра.

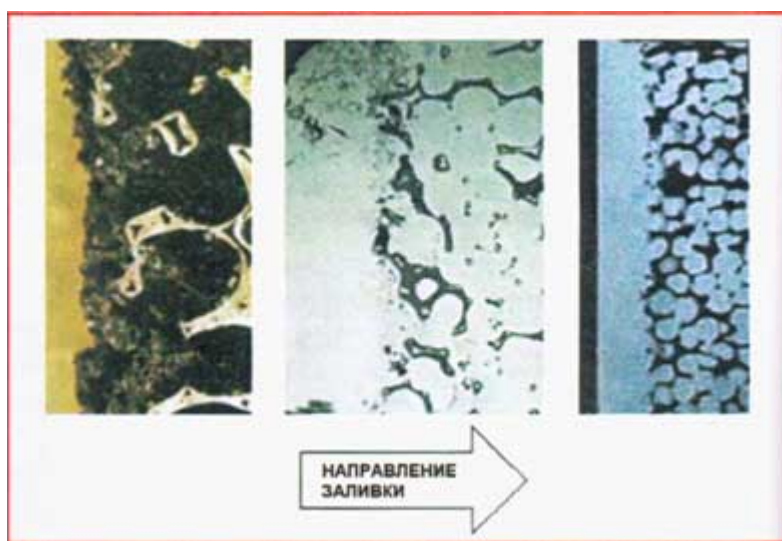


Рисунок 1.12 – Очистка расплава от неметаллических включений

Наконец, пенокерамические фильтры помогают предотвратить формирование вторичных окислов, снижая турбулентность потока, проходящего, через фильтр [6; 9].

Турбулентность заливки необходимо снижать при литье любых сплавов и особенно при литье сплавов, склонных к быстрому окислению. Турбулентность способствует захвату воздуха, формированию и росту оксидных включений в чистом расплаве, имеющем взаимодействие с воздухом. Выбор фильтра, его размещение и конструкция литниковой системы являются фундаментальными критериями для снижения вторичного окисления расплава. Многочисленные эксперименты с применением анализа водного потока, рентгеновской установки и моделирования заливки, окончательно подтвердили, что правильно примененные пенокерамические фильтры, оказывают наибольшее влияние на предотвращение вторичного окисления расплава в форме. Прессованные фильтры имеют сравнительно большую «мертвую зону» со стороны выхода расплава из фильтра, что способствует возникновению воздушных пузырьков в потоке металла после фильтра.

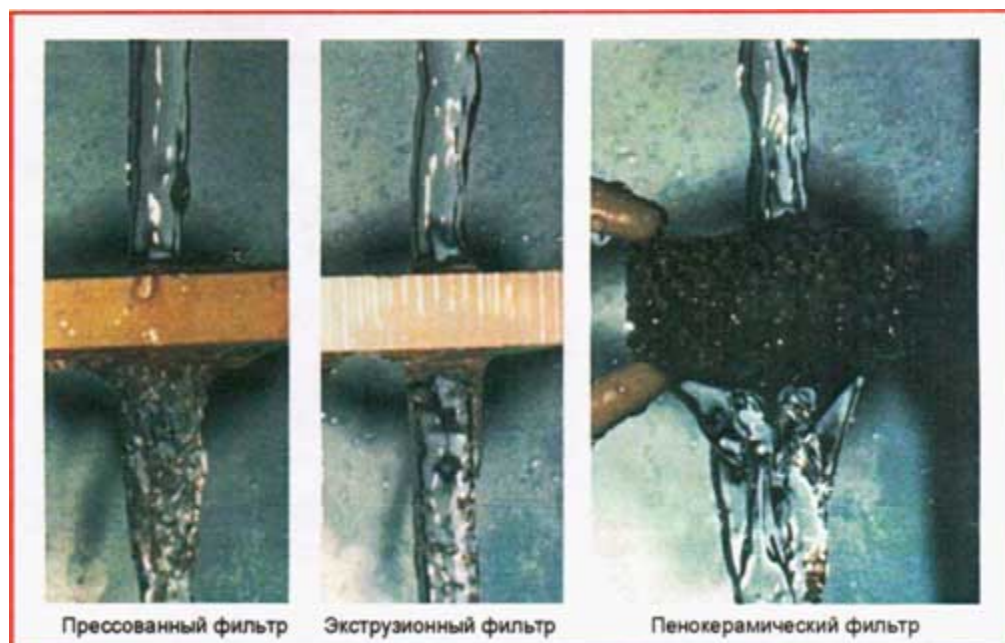


Рисунок 1.13 – Сравнение потока воды, проходящего через различные фильтры

Площадь потока, выходящего из пенокерамического фильтра, намного больше, что свидетельствует о замедлении и снижении турбулентности потока, при этом воздушные пузырьки на выходе из фильтра отсутствуют (рисунок 1.13).

При повторении того же эксперимента с насыщенным воздухом водным потоком можно отметить, что прессованный и экструзионный фильтр не оказывают совершенно никакого влияния на захваченные воздушные пузырьки. Пенокерамический фильтр снижает скорость потока, что помогает захваченному воздуху выходить из металла. Тот же механизм снижает турбулентность потока и позволяет добиться высокой эффективности фильтрации с применением пенокерамических фильтров [13-16].

Дальнейшее подтверждение способности пенокерамических фильтров сгладить поток получено с применением рентгеновской съемки процесса заливки металла (рисунок 1.14).



Рисунок 1.14 – Рентгеноскопический анализ показывает способность фильтра снизить турбулентность металла, втекающего в отливку

1.7 Свойства фильтров

Свойства, характерные для трех основных типов фильтров, представлены таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Свойства фильтров

Свойства	Пенокерамический	Экструзионный	Прессованный
Геометрическая точность	Средняя	Высокая	Высокая
Холодная прочность	Средняя	Средняя	Высокая
Эффективность фильтрации	Высокая	Средняя	Средняя
Размер задерживаемых частиц	Мелкие	Средние	Средние/грубые
Влияние на скорость потока	Высокое	Среднее	Среднее

Окончание таблицы 1.1

Свойства	Пенокерамический	Экструзионный	Прессованный
Снижение турбулентности	Высокое	Минимальное	Минимальное
Сопротивление эрозии	Высокое	Среднее	Среднее
Огнеупорность	Высокая	Средняя	Хорошая

Таким образом, пенокерамические фильтры превосходят другие фильтры по четырем ключевым свойствам:

- 1) способность задерживать более мелкие включения;
- 2) снижение скорости и турбулентности потока уменьшает эрозию формы;
- 3) снижение вторичного окисления расплава захваченным воздухом благодаря отсутствию турбулентности потока после фильтра;
- 4) более высокая стойкость к термодинамическому удару при заливке.

Преимущества применения пенокерамических фильтров заключается не только в снижении брака, но отражаются также и в других технологических процессах литейного производства. В зависимости от типа сплава и технологии применения можно добиться таких преимуществ, как:

- 1) Повышение производительности:

Благодаря фильтру можно исключить шлакоулавливающие элементы литниковой системы, тем самым повысить выход годного, что способствует экономии на всех этапах производства. Фильтр способствует снижению скорости и турбулентности металла в форме, поэтому можно упростить конструкцию литниковой системы. Упрощение конструкции литниковой системы позволяет разместить в форме дополнительные отливки. Повышение

выхода годного также означает, что можно залить больше форм в расчете на тонну выплавленного металла во многих случаях можно снизить температуру заливки. Специальные фильтры, разработанные для алюминиевых сплавов, имеют низкую плотность, при переплаве возврата они всплывают на поверхность расплава и легко могут удаляться со шлаком.

2) Повышение качества литья:

- повышение однородности по чистоте литья;
- снижение колебаний скорости металла при ручной заливке позволяет добиться однородности литья;
- повышение механических свойств за счет однородности структуры;
- повышение текучести металла способствует улучшению качества поверхности, внешнего вида и точности воспроизведения деталей литья.

3) Упрощение финишных операций:

- повышение обрабатываемости и снижение износа инструмента;
- допуски на механическую обработку можно сократить благодаря снижению уровня включений;
- снижение времени на визуальный осмотр и дорогие трудоемкие методы неразрушающего контроля;
- сокращение времени цикла, особенно там, где серьезные сокращения объема финишных операций позволили добиться повышенной гибкости производственного графика и конкурентоспособности литейного производства;
- фильтры для алюминиевых сплавов имеют некерамическую структуру и в случае попадания их частиц в отливку не повреждают режущий инструмент механообрабатывающего станка [12; 13].

1.8 Существующие аналоги

SIVEX – фильтр. Полная система фильтрования SIVEX® включает в себя два основных компонента, а именно, фильтровальную коробку SIVEX и пенокерамический фильтр SIVEX. Пригодная для непрерывного или

периодического литья с одинарным или двойным фильтровальным гнездом в монолитной футеровке, фильтровальная коробка SIVEX является модульной системой, способной удовлетворить требования к фильтрации. Дополнительно может содержать программируемое логическое регулирование (PLC) для предварительного нагрева системы, крышки и перегородки. Система предварительного нагрева обеспечивает эффективный и рациональный нагрев всей поверхности пенокерамических фильтров SIVEX и, таким образом, позволяет избежать обычной проблемы горячих участков. Это важно, для достижения оптимальной эффективности пенокерамических фильтров. Система имеет также регулируемые по высоте опоры, с помощью которых можно точно согласовать ее с существующей системой желобов. Другим важным компонентом системы являются пенокерамические фильтры SIVEX. В результате обширных исследований и разработок появилась возможность точно регулировать размеры пор пенокерамических фильтров. Это позволило фирме Pyrotek (Швейцария) установить общие мировые стандарты для технологии этого типа [26].



Рисунок 1.15 – SIVEX - фильтр

Фильтровальные коробки SIVEX с одинарным или двойным фильтровальным гнездом снабжены крышками с пневмоприводом. Крышки

уменьшают тепловые потери при литье, и на них расположена система предварительного нагрева фильтров. Горелка и камера сгорания этой системы, которые создают поток горячего воздуха, расположены по центру над пенокерамическим фильтром SIVEX и обеспечивают эффективный предварительный нагрев. Для двойных фильтровальных коробок требуется только система одиночного предварительного нагрева, так как в них используется коллектор с крышкой для подачи горячего воздуха к фильтрам.

Достоинства: равномерная температура фильтра, отсутствие термоудара, известное время предварительного нагрева.

Недостатки: высокая стоимость, невозможность серийного производства, неудобная для обслуживающего персонала система открывания крышки с нагревательными элементами [10].

Фильтр тонкой очистки PDBF. PDBF® (Pechineydeepbedfiltration) – фильтр тонкой очистки (PDBF) производства Novelis PAE предназначен для обеспечения высокого уровня качества алюминиевых сплавов тонких продуктов: тонкий алюминиевый лист -алюминиевая тара, алюминиевая фольга, лигোগрафический лист. Жидкий металл внутри фильтра проходит через глубокий фильтрующий слой (около 50 см) калиброванных шаров и щебня глинозема, мелкие инородные включения при этом захватываются фильтрующими элемент благодаря механическому воздействию. Конструкция PDBF фильтр тонкой очистки позволяет добиться максимальной эффективности фильтрации и низких эксплуатационных расходов благодаря длительному сроку службы расходных материалов фильтрующего слоя.



Рисунок 1.16 – Фильтр тонкой очистки PDBF

Основные преимущества PDBF фильтр тонкой очистки :

- Низкие эксплуатационные расходы;
- Увеличенный срок службы глубокого фильтрующего слоя, до 7000 тонн;
- Замена фильтра осуществляется за один день при использовании крышки предварительного нагрева;
- Высокая эффективность фильтрации;
- Высокий уровень удаления включений, почти 100% частиц с размером св. 10 мкм;
- Композиция фильтрующего слоя адаптирована для удовлетворения самых взыскательных целевых показателей по качеству алюминия на выходе.

Хороший металлургический контроль.

- Мощная система нагрева крышки: от 3 до 9 нагревателей в зависимости от производительности.
 - Дополнительные нижние погружные нагреватели (запатентованная технология) от 1 до 3 мини-нагревателей.
- 1) Максимальный градиент температуры не более 10 °С. Фильтр работает при меньшей температуре нагрева поверхности расплава, т.е. достигается меньшее окисление расплава.
 - 2) Корпус фильтра имеет пятислойную теплоизоляцию минимизирующую потери температуры расплава

3) Недостатки: высокая стоимость, невозможность серийного производства, неудобная для обслуживающего персонала система открывания крышки с нагревательными элементами.

Фильтры Ceralu выпускаются фирмой «DracheUmwelttechnik» (Германия). Фирма DRACHE UmwelttechnikGmbH производит под маркой CeraPor широкую гамму пенокерамических фильтров как по фильтруемым материалам, так и по геометрическим характеристикам. Использование фильтров CeraPor в различных литейных процессах объясняет широкую гамму производимых фильтров:

Ceralu – керамический вспененный фильтр на основе оксида алюминия. Разработан специально для фильтрования алюминия при температуре до 1150°C

Cerazirk – керамический вспененный фильтр на основе диоксида циркония для фильтрования стали при температуре до 1700°C

Cerasic – керамический вспененный фильтр на основе карбида кремния для фильтрования высокопрочного и ковкого чугуна, а также цветных металлов при температуре до 1420°C.

Фильтры CeraPor отличаются высокой фильтрующей способностью при низких перепадах давления. В зависимости от массы фильтруемого металла и требуемой скорости фильтрования, пористость фильтра может составлять от 10 до 60 ppi (пор на дюйм).

Стандартный ряд фильтров CeraPor позволяет устанавливать их как в горизонтальном, так и в вертикальном положении. Форма фильтров может быть как прямоугольной, так и круглой. Качество фильтров CeraPor обеспечивается постоянным контролем специальным департаментом качества. Каждая партия фильтров проходит тестирование на перепад давления, точность по массе.

Фильтры Ceralu изготовлены на основе Al₂O₃ и предназначены для фильтрации расплавов при температурах не превышающих 1150°C. Фильтры Ceralu имеют равномерную структуру пор и высокую поверхностную твёрдость, обеспечивающую отсутствие «пыления» фильтра и превосходную

химическую стабильность ко многим химическим элементам присутствующим, в частности, в сплавах группы 8xxx.

По геометрическим характеристикам фильтры Ceralu могут производиться как стандартных размеров, принятых в металлургической отрасли (от 7 до 23 дюймов), так и любых других форм и размеров. Уплотняющая прокладка может быть терморасширяемой из специального вспенивающегося материала или из обыкновенной огнеупорной ваты.

Пористость пенокерамических фильтров, традиционно измеряемая в количестве пор на квадратный дюйм-ppi, может варьироваться от 10 до 60. Фильтры имеют высокий уровень открытой поверхностной пористости, контролируемый для каждого фильтра как непосредственно - визуально, так и опосредованно – через измерение падения давления за фильтром [11].

Двойные фильтры Duplexfilter. Двойной фильтр – разработанный фирмой «Drache фильтр, объединяющий в себе две различные пористости. Эти фильтры используются так же, как и другие фильтры. Пропускная способность Duplexfilter примерно соответствует пропускной способности «обычного» фильтра такой же пористости, как среднее значение пористостей Duplexfilter, т.е. пропускная способность 20" Duplex 30/50 ppi соответствует пропускной способности 20" 40 ppi обычного фильтра. Фильтры Duplexfilter рекомендуется применять там, где предъявляются особо высокие требования к чистоте металла (где мельчайшие включения приводят к проблемам при изготовлении готового продукта). Имеются Duplexfilter таких же размеров, как и «обычные» фильтры, т.е. от 9 до 23". Это означает, что Duplexfilter можно вставить в фильтр-бокс. Принципиально возможна различная комбинация пористости, исключение составляет только 10 ppi (технически не рационально). Чаще всего используют следующие комбинации 30/50 или 40/60 ppi [25].

Для изготовления двойного фильтра, как и для «обычного», используют одно и то же сырье. Посредством разработанного компанией специального процесса поролон перед пропитыванием связывают друг с другом. При этом соприкасающаяся поверхность между поролоном образует твердое соединение,

которое одновременно остается открыто-пористым, однако без остатков клея или прочего. Эффективная двухступенчатая фильтрация достигается благодаря сочетанию различной пористости, поскольку между ячейками разного размера задерживается большее количество маленьких частиц.

При предварительном нагреве необходимо особо обратить внимание на то, чтобы обе стороны фильтра были одинаково прогреты.

Фильтровальные коробки фирмы «Drache». Фильтровальные коробки (боксы) предназначены для установки в них пенокерамических фильтров. Боксы производятся фирмой «Drache» Германия (рисунок 17).

Фильтровальные установки возможны различных размеров, одно- или двухкамерные. Кроме этого установки могут быть как с горизонтальным, так и с вертикальным расположением фильтров. Вертикальные фильтровальные установки используются там, где мало площади между печью (дегазатором) и литейным столом. Площадь основания вертикального фильтр-бокса примерно в 2,5 раза меньше основания горизонтальных установок того же размера. Таким образом, их легко эксплуатировать и производить их техническое обслуживание. Для обеспечения оптимальной эффективности фильтров необходим их предварительный нагрев.



Рисунок 1.17 – Фильтровальные коробки фирмы «Drache»

Для предварительного нагрева фильтров фирма «Drache» использует горелки компании «Wiedemann Industrie Brenner», расположенной в Штокахе (Германия). Эти горелки являются газовыми горелками для форсированного сжигания, они отличаются очень высокой скоростью распространения пламени (до 150 м/с), которая обеспечивает равномерный предварительный нагрев пенокерамических фильтров, а также возможность использования фильтров больших размеров (до 26").

Горелки поставляются с пультом управления, позволяющим очень точно установить смесь газа и сжатого воздуха, наличие возможностей осуществления различного контроля и защитные устройства. Кроме того, горелки фирмы «Wiedemann» надежны, прочны, легки и безопасны в работе и требуют всего лишь незначительного технического обслуживания [25].

Выводы по главе

1. Изучены возможные методы фильтрации алюминия от неметаллических включений. Разобрана теория фильтрации. Проведен сравнительный анализ свойств основных типов фильтров.

2. Произведен поиск существующих аналогов установки, анализ преимуществ и недостатков, анализ способов их исследования, разработки путей дальнейшего совершенствования.

3. На основании первой главы можно сделать вывод о том, что наиболее эффективную фильтрацию алюминия может обеспечить пенокерамический фильтр. Существующие установки фильтрации не могут обеспечить одинаково эффективный предварительный нагрев и поддержание температуры расплава при литье, поэтому разработка установки с комбинированным нагревом является актуальной задачей.

2 Математическое моделирование теплофизики

2.1 Законы конвективного теплообмена

Процессы конвективного тепло- и массообмена происходят в результате движения теплоносителя (жидкости или газа) и всегда тесно связаны с соответствующими процессами молекулярного переноса (теплопроводностью и диффузией).

В зависимости от причины движения теплоносителя различают конвекцию вынужденную и свободную (естественную). В первом случае движение теплоносителя обусловлено внешними причинами: насосом, вентилятором, компрессором и т.д. Во втором случае движение теплоносителя вызвано неоднородностью температур или концентрацией компонентов теплоносителя [17-18].

Конвективная теплоотдача играет важную роль при нагреве металла в печах, при химико-термической обработке металла, формировании слитка. При этом, как правило, основную роль играет вынужденная конвекция, однако и свободно конвективный теплообмен определяет теплоотдачу от нагретых поверхностей в окружающую среду.

При конвективном теплообмене перенос теплоты неразрывно связан с переносом массы. Если текучая среда плотностью ρ [кг/м³] движется в направлении оси x со скоростью u_x [м/с], то ее массовая скорость характеризует массу среды, проходящей в единицу времени через единичную площадку

$$\rho u_x \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}} \Rightarrow \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \right]. \quad (2.1)$$

Теплосодержание среды может быть выражено через удельную теплоемкость c [Дж/(кг К)] и температуру T :

$$cT \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{К}}{\text{К}} \Rightarrow \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]. \quad (2.2)$$

Плотность теплового потока, определяемая конвекцией, равно произведению массовой скорости на теплосодержание:

$$q_k = \rho u_x cT \left[\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}} \Rightarrow \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right]. \quad (2.3)$$

Конвекция всегда сопровождается теплопроводностью, поэтому общая плотность теплового потока при конвективном теплообмене с учетом закона теплопроводности Фурье имеет вид:

$$\vec{q} = \vec{q}_T + \vec{q}_k = -\lambda \nabla T + \rho c T \vec{u}. \quad (2.4)$$

Конвективный теплообмен между потоком текучей среды и поверхностью соприкасающегося тела называется теплоотдачей. При расчетах теплоотдачи используют закон Ньютона-Рихмана:

$$d\Phi = a(T_n - T_c) dS, [\text{Вт}]. \quad (2.5)$$

В котором разность между температурой поверхности тела (T_n) и температурой окружающей среды (T_c) называется температурным напором; a – коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{d\Phi / dS}{T_n - T_c}, \left[\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}} \right]. \quad (2.6)$$

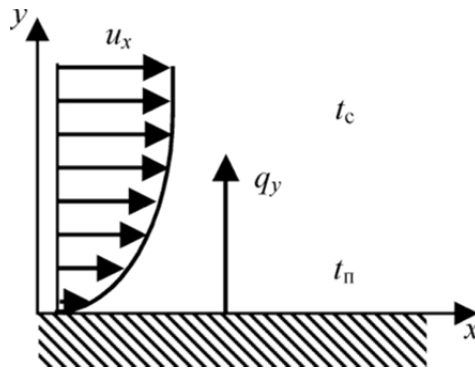


Рисунок 2.1 – Схема теплоотдачи

Коэффициент теплоотдачи характеризует плотность теплового потока на границе текучей среды и соприкасающегося с ней тела, отнесенную к температурному напору.

Таким образом, плотность теплового потока при конвективном теплообмене между поверхностью тела и окружающей средой определяется уравнением теплоотдачи:

$$q_k = a(T_n - T_c). \quad (2.7)$$

Аналогичное уравнение описывает массоотдачу. При этом плотность потока массы i -го компонента смеси определяется суперпозицией концентрационной, термо- и бародиффузии:

$$q_{mi} = - \left(D \frac{\partial C_i}{\partial n} + \frac{D_T}{T} \frac{\partial T}{\partial n} + \frac{D_p}{p} \frac{\partial p}{\partial n} \right), \quad (2.8)$$

где D_m, D_p – коэффициенты термо- и бародиффузии, $D_m = k_T D$, $D_p = k_p D$; k_T, k_p – термо и бародиффузионные отношения:

$$k_T = D_T / D, k_p = D_p / D. \quad (2.9)$$

Коэффициент пропорциональности D характеризует концентрационную диффузию и называется коэффициентом концентрационной диффузии

$$D = \frac{|q_{mi}|}{|\partial C_i / \partial n|}. \quad (2.10)$$

Коэффициент концентрационной диффузии (коэффициент диффузии) характеризует плотность потока массы i -го компонента смеси при единичном градиенте концентрации примеси.

Термодиффузия происходит в смеси с неоднородной температурой: более тяжелые молекулы стремятся перейти в холодные области (эффект Соре).

Бародиффузия происходит в смеси с неоднородным давлением: тяжелые молекулы стремятся перейти в область повышенного давления.

При равенстве молекулярных масс компонентов смеси термо- и бародиффузия отсутствует, основную роль играет концентрационная диффузия, соотношение (2.8) переходит в закон Фика.

2.2 Уравнения конвективного теплообмена

Дифференциальное уравнение неразрывности (сплошности) вытекает из закона сохранения массы текучей среды и накладывает, поэтому, ограничения на скорости течения. Этот закон постулирует следующее: изменение массы контрольного объема в некоторый промежуток времени течения среды должно компенсироваться изменением ее плотности за этот же промежуток времени. Вывод уравнения рассмотрим на примере одномерного течения в канале (рисунок 2.2).

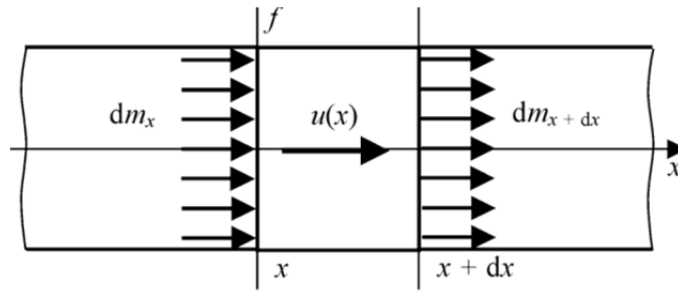


Рисунок 2.2 – Расчетная схема к выводу уравнения неразрывности

В некотором сечении канала x с площадью поперечного сечения f среда объемом $f dx$ плотностью ρ течет со скоростью u в направлении возрастания координаты x . Используя понятие массовой скорости ρu , кг/(м²·с), запишем расход массы за время $d\tau$ через левую и правую грани контрольного объема:

$$dm_x = (\rho u)_x f d\tau; dm_{x+dx} = (\rho u)_{x+dx} f d\tau. \quad (2.11)$$

Раскладывая массовую скорость в ряд Тейлора

$$(\rho u)_{x+dx} = (\rho u)_x + \frac{\partial(\rho u)_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{1!} + \dots \quad (2.12)$$

и учитывая два члена разложения, можно получить возрастание массы в контрольном объеме:

$$dm_{x+dx} - dm_x \approx \frac{\partial(\rho u)_x}{\partial x} dx f d\tau. \quad (2.13)$$

Это возрастание массовой скорости в направлении координаты x должно компенсироваться убыванием массы контрольного объема во времени:

$$\frac{\partial(\rho u)_x}{\partial x} dx \cdot f \cdot d\tau = -\frac{\partial m_x}{\partial \tau} d\tau = -\frac{\partial \rho}{\partial \tau} f dx \quad (2.14)$$

Отсюда

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0. \quad (2.15)$$

Полученное одномерное уравнение неразрывности распространяется и на трехмерный случай, когда массовая скорость изменяется и в направлении двух других координат:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0, \quad (2.16)$$

где u, v, w – проекции скорости соответственно на оси x, y, z . В частном случае для среды с постоянной плотностью (несжимаемой, $\rho = \text{const}$) уравнение неразрывности переходит в уравнение несжимаемости:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2.17)$$

При одномерном течении несжимаемой среды ($v = w = 0$)

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad (2.18)$$

т.е. скорость в канале постоянного сечения не изменяется в направлении течения.

Для произвольной системы координат уравнение неразрывности (2.11) может быть записано в обозначениях теории поля:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \operatorname{div}(\rho \vec{W}) = 0, \quad (2.19)$$

где \vec{W} – вектор скорости; $\operatorname{div} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$ – операция дивергенции в прямоугольных декартовых координатах.

Из уравнения неразрывности (2.14) следует частный случай стационарного ($\partial \rho / \partial \tau = 0$) одномерного течения по осям в канале переменного сечения:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = 0, \quad (2.20)$$

откуда

$$\rho u = \operatorname{const} = \frac{G}{f}, \quad (2.21)$$

где G , кг/с – массовый секундный расход в канале площадью поперечного сечения f . Из последнего уравнения следует постоянство расхода при стационарном течении в канале:

$$\rho u f = G = \operatorname{const}, \quad (2.22)$$

а при течении несжимаемой среды ($\rho = \operatorname{const}$) из уравнения (2.22) следует обратно пропорциональная зависимость между скоростью течения и площадью поперечного сечения канала: скорость возрастает в сужающихся и падает в расширяющихся участках канала.

Дифференциальное уравнение переноса энергии характеризует зависимость между температурой, временем и координатами в

дифференциальной форме и является частным случаем первого закона термодинамики:

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (2.23)$$

В соответствии с которым подводимая теплота dQ расходуется на увеличение внутренней энергии dU и на работу расширения dA . В результате для одномерного случая (рисунок 2.3) из (2.23) можно получить следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{q_v}{\rho c}, \quad (2.24)$$

где α – коэффициент температуропроводности, определяемый отношением коэффициента теплопроводности к плотности и теплоемкости

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c} \left[\frac{Вт}{м \cdot К} \frac{м^3}{кг} \frac{К}{Дж} \Rightarrow \frac{м^2}{с} \right]; \quad q_v - \text{мощность внутренних источников тепла,}$$

Вт/м³.

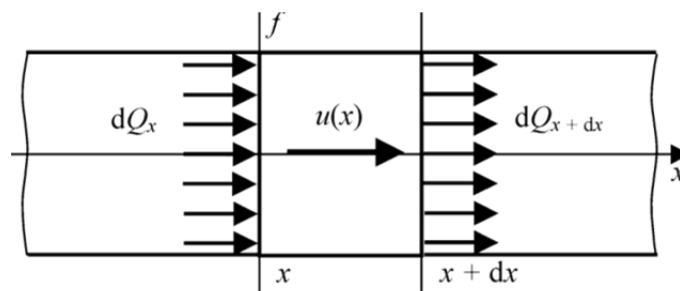


Рисунок 2.3 – Расчетная схема к выводу уравнения переноса энергии

Физический смысл полученного уравнения заключается в следующем: тепловая энергия, подведенная к контрольному объему внутренними источниками заданной мощности, а так же теплопроводностью и конвекцией,

идет на изменение внутренней энергии этого объема. Коэффициент температуропроводности характеризует скорость изменения температуры.

Производная $\partial T / \partial \tau$ характеризует локальное или местное изменение температуры, а $u \partial T / \partial x$ – изменение температуры, связанное с переносом (конвекцией) контрольного объема со скоростью u . Их сумма дает полное изменение внутренней энергии и называется полной или субстанциальной производной:

$$\frac{dT}{d\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot \frac{dx}{x\tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (2.25)$$

Уравнение (2.24) можно обобщить на трехмерный случай:

$$\frac{dT}{d\tau} = a \nabla^2 T + \frac{q_V}{\rho c}, \quad \frac{dT}{d\tau} = a \cdot \text{div grad } T + \quad (2.26)$$

В частности, в прямоугольной декартовой системе координат полная производная, операторы Лапласа $\nabla^2 T$ и дивергенции div имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{dT}{d\tau} &= \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}, \\ \nabla^2 T &= \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad \text{div} = \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Приведем также выражение оператора Лапласа и дивергенции для цилиндрической системы координат

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad \text{div} = \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \phi} + \frac{\partial}{\partial z}. \quad (2.28)$$

В уравнение переноса энергии входят компоненты скоростей вязкой среды. Следовательно, для нахождения поля температур необходимо знать поле скоростей. Такое поле описывается уравнением движения, являющимся частным случаем второго закона Ньютона. Рассмотрим одномерное течение с изменением скорости в поперечном направлении. Для выделенного на рисунке 2.4 контрольного объема запишем второй закон Ньютона:

$$\frac{du}{d\tau} dm = df_1 + df_2 + df_3, \quad (2.29)$$

где df_1 , df_2 и df_3 – соответственно равнодействующие сил тяжести, внешнего давления и вязкого трения.

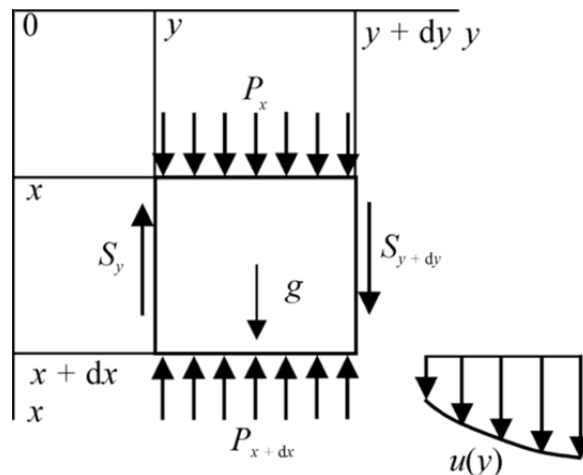


Рисунок 2.4 – Расчетная схема

В соответствии с гипотезой Ньютона касательное напряжение S_y , [Па] между слоями вязкой среды принимаем пропорциональным градиенту скорости в поперечном направлении:

$$S_y = \mu \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (2.30)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости,

$$\mu = \frac{|S_y|}{|\partial u / \partial y|}, \left[\text{Па} \frac{\text{с}}{\text{м}} \Rightarrow \text{Па} \cdot \text{с} \right]. \quad (2.31)$$

Он характеризует касательное напряжение при единичном градиенте скорости.

На практике применяют также коэффициент кинематической вязкости:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{кг} / \text{м}^3} \Rightarrow \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2} \frac{\text{м}}{\text{Н} \cdot \text{с}^2} \text{м}^3 \Rightarrow \frac{\text{м}^2}{\text{с}} \right], \quad (2.32)$$

размерность которого совпадает с размерностью коэффициента температуропроводности.

После преобразований уравнение (2.29) принимает вид:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} = g - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (2.33)$$

в котором составляющие правой части характеризуют соответственно силы тяжести, внешнего давления и вязкого трения, а левой части – инерционные силы. Физический смысл полученного уравнения заключается в равновесии указанных сил для элементарного объема вязкой среды.

В трехмерном случае в левой части уравнения (2.29) появляются дополнительные конвективные члены, характеризующие пространственный перенос среды, а также добавки к силам трения, действующим по всем граням контрольного объема в форме параллелепипеда. В результате уравнение движения в проекции на ось x принимает следующий вид:

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \nu \nabla^2 u, \quad (2.34)$$

где

$$\frac{du}{d\tau} = \frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}, \quad \nabla^2 u = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}. \quad (2.35)$$

Аналогичный вид имеют проекции уравнения движения и на две другие оси y, z . Полученную систему трех уравнений движения, называемых уравнениями Навье – Стокса, можно представить в векторной форме:

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial \tau} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla \rho + \nu \nabla^2 \vec{W}, \quad (2.36)$$

где $\vec{W}(u, v, w)$ – вектор скорости; $\nabla \rho$ - градиент давления.

Теплоотдачей называется теплообмен между твердой поверхностью и вязкой средой, обтекающей эту поверхность. Практика показывает, что плотность теплового потока при теплоотдаче прямо пропорциональна разности температур вязкой среды T_c и поверхности твердого тела T_n , называемой температурным напором. Примем для определенности $T_n > T_c$, тогда уравнение теплоотдачи (уравнение Ньютона) будет иметь вид:

$$q = \alpha(T_n - T_c), \quad (2.37)$$

где α [Вт/м²·К] – коэффициент теплоотдачи, равный плотности теплового потока на твердой границе при единичном температурном напоре. Коэффициент теплоотдачи может изменяться от нуля до бесконечности. Действительно, как следует из (2.37), при $\alpha = 0, q = 0$ (адиабатная поверхность),

а при $\alpha \rightarrow \infty q/\alpha = 0$ и $T_n = T_c$ (изотермическая поверхность). Решить уравнение (3.25) относительно неизвестного коэффициента теплоотдачи без привлечения дополнительной гипотезы не удастся, так как не известна плотность теплового потока у твердой границы [23].

Для формулировки этой гипотезы рассмотрим понятие гидродинамического пограничного слоя, введенное Л. Прандтлем в 1904 г., на примере обтекания плоской поверхности потоком вязкой среды, движущейся с постоянной скоростью u_c параллельно этой поверхности (рисунок 2.5). Частицы среды у твердой поверхности тормозятся, что является причиной искажения профиля скорости. Это искажение можно характеризовать градиентом du/dy , который обращается в нуль на некотором удалении от поверхности в невозмущенном потоке. Динамическим пограничным слоем называется слой заторможенной вязкой среды толщиной δ_d у твердой поверхности, в пределах которого $du/dy \neq 0$.

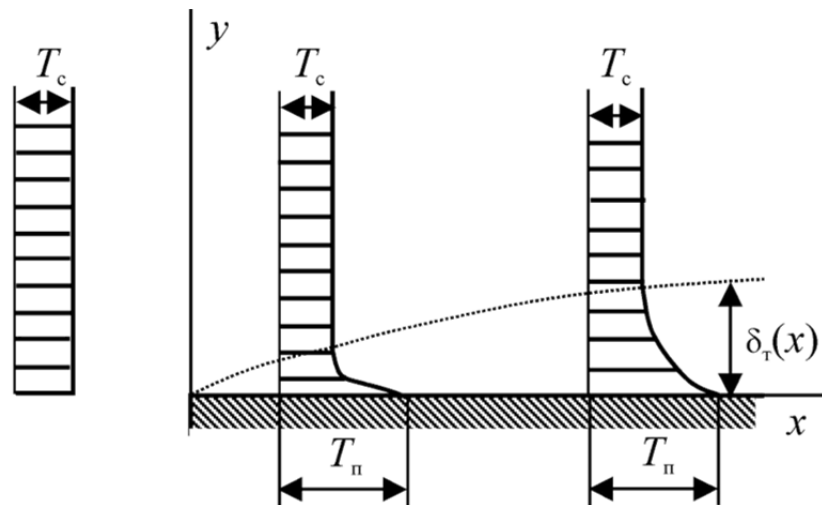


Рисунок 2.5 – Схема к понятию динамического пограничного слоя

Аналогично понятию динамического пограничного слоя Г. Кружилин в 1936 г. ввел понятие температурного пограничного слоя. При движении у твердой поверхности частицы вязкой среды, имеющие температуру T_c , при торможении у поверхности нагреваются до температуры этой поверхности T_n

(рисунок 2.6). Температурным пограничным слоем называется слой вязкой среды толщиной δ_t у твердой поверхности, в пределах которого $\partial T / \partial y \neq 0$.

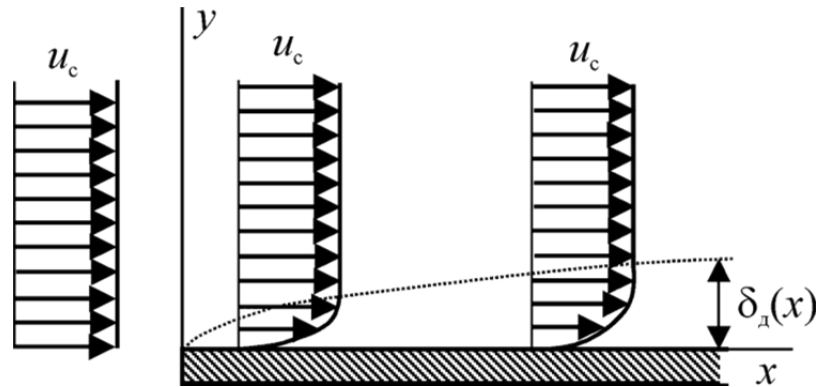


Рисунок 2.6 – Схема к понятию температурного пограничного слоя

На практике толщины пограничных слоев определяют как расстояния от твердой стенки до поверхностей, на которых скорость и температура составляют 99 % от их значений в не-возмущенной среде (u_c , T_c).

Суть гипотезы пограничных слоев состоит в том, что сила вязкого трения $S_y = \mu(\partial u / \partial y)$ проявляется в пределах динамического пограничного слоя, а процесс теплоотдачи осуществляется в пределах температурного пограничного слоя и подчиняется закону теплопроводности Фурье $q = -\lambda(\partial T / \partial y)$.

Подставляя эту плотность теплового потока из закона Фурье в уравнение теплоотдачи (2.37), получаем уравнение теплоотдачи в пограничном слое:

$$\alpha = \frac{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)}{T_n - T_c}, \quad (2.38)$$

коэффициент теплопроводности λ в котором относится к вязкой среде в пограничном слое.

2.3 Приближение Буссинеска в задачах свободной тепловой конвекции

Свободная конвекция жидкости определяется разностью плотностей холодных и нагретых ее слоев. Уравнение Навье – Стокса в форме (2.39) получено без учета зависимости физических свойств жидкости от температуры, в частности, в нем не учтена зависимость плотности от температуры.

Уравнения Навье – Стокса приближенный способ учета переменной плотности в неоднородном температурном поле, называемый приближением Буссинеска:

$$\rho \frac{du}{d\tau} = \rho g - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (2.39)$$

Входящая в это уравнение плотность принимается в соответствии с уравнением состояния линейно зависящей от температуры:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] = \rho_0 (1 - \beta \Delta T), \quad (2.40)$$

где β , [1/K] – коэффициент теплового (объемного) расширения. После подстановки зависимости (2.35) в уравнение (2.34) получаем:

$$\rho_0 (1 - \beta \Delta T) \frac{du}{d\tau} = \rho_0 (1 - \beta \Delta T) g - \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (2.41)$$

Так как ускорение свободного падения значительно больше ускорения частиц жидкости при свободной конвекции ($g \gg du/d\tau$), то изменением плотности в левой части уравнения (3.36) можно пренебречь по сравнению с изменением ее в правой части уравнения, в результате получаем:

$$\rho_0 \frac{du}{d\tau} = \rho_0(1 - \beta\Delta T)g - \frac{\partial\rho}{\partial x} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}, \quad (2.42)$$

или после деления на плотность получим:

$$\frac{du}{d\tau} = (1 - \beta\Delta T)g - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial\rho}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}. \quad (2.43)$$

Полученное одномерное уравнение описывает свободную тепловую конвекцию жидкости в приближении Буссинеска.

В общем трехмерном случае для вектора скорости $\vec{W}(u, v, w)$ уравнение движения в этом приближении принимает вид:

$$\frac{d\vec{W}}{d\tau} = (1 - \beta\Delta T)\vec{g} - \frac{1}{\rho_0} \nabla\rho + \nu \nabla^2 \vec{W}. \quad (2.44)$$

2.4 Постановка задачи и основные допущения

Уравнения Буссинеска для бинарной смеси, уравнение состояния которой задано в виде

$$\rho = \rho(c, T). \quad (2.45)$$

Уравнению гидростатики

$$\text{grad}\rho_0 = \rho_0 g, \quad (2.46)$$

где g - ускорение, создаваемое массовыми силами.

Тогда справедливы следующие представления:

$$\begin{aligned}
 & -g + \beta_T g T' + \beta_c g c' + \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{\partial \rho'}{\partial y}, \\
 & \beta_T = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_{\rho, c}, \\
 & \beta_c = -\frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{\partial \rho}{\partial c} \right)_{\rho, T}, \\
 & T' = T - T_0, \\
 & c' = c - c_0,
 \end{aligned} \tag{2.47}$$

где T_0, c_0 ; - некоторые постоянные величины, от которых отчитываются соответственно температура и концентрация, причем $T' \ll T_0, c' \ll c_0$.

При выводе исходной системы в уравнениях количества движения плотность всюду, за исключением подъемной силы, считается постоянной. Предполагаются постоянными также коэффициенты вязкости, теплопроводности, удельной теплоемкости, диффузии. При написании уравнений притока тепла и диффузии пренебрегается выделением тепла за счет вязкой диссипации и работы сил сжатия, термо- и бародиффузионными эффектами. При этих предположениях уравнения движения, переноса тепла и массы неоднородной жидкости можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V}{\partial t} + (V \nabla) V &= -\frac{1}{\rho} \nabla \rho' + \nu \nabla^2 V + g \left(\beta_T T' + \beta_c c' \right), \\
 \operatorname{div} V &= 0, \\
 \rho C_p \left[\frac{\partial T'}{\partial t} + (V \nabla) T' \right] &= \lambda \nabla^2 T',
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

$$\left(\frac{\partial c'}{\partial t} + (V \nabla) c' \right) = D \nabla^2 c'.$$

В этой системе уравнений искомыми являются вектор скорости V , давление ρ' , температура T' , концентрация примеси c' (точнее, отклонения последних от их статических значений), которые зависят от пространственных координат и времени t . Параметрами являются плотность, коэффициенты кинематической вязкости $\nu = \mu / \rho$ где μ коэффициент динамической вязкости, теплопроводности λ , диффузии D , удельной теплоемкости при постоянном давлении C_p а также ускорение свободного падения g и коэффициенты теплового и концентрационного изменения плотности β_T и β_c , определенные выше.

Важной особенностью системы являются так называемые граничные условия прилипания, в соответствии с которыми все компоненты скорости на твердой неподвижной стенке равны нулю:

$$V_r = 0. \tag{2.49}$$

В дальнейшем будет часто использоваться модель плоской фиксированной поверхности жидкости, поверхностное натяжение которой зависит от температуры и концентрации: $\sigma = \sigma_0 (\beta_{\sigma T} T' + \beta_{\sigma c} c')$. Тогда граничные условия для компонент скорости будут иметь вид:

$$V = 0, \mu \frac{\partial U}{\partial n} = \frac{\partial \sigma}{\partial t} = \sigma_0 \left(\beta_{\sigma T} \frac{\partial T'}{\partial t} + \beta_{\sigma c} \frac{\partial c'}{\partial t} \right), \tag{2.50}$$

где n — нормаль, t — касательная к поверхности жидкости.

Граничные условия для полей температуры и концентрации могут быть трех основных типов:

- 1) Задана температура T_2 (концентрация примеси c_2) на границе.
- 2) Задан поток тепла $q_2 = -\lambda \partial T / \partial n$ (диффузионный поток $j_2 = -D \partial c / \partial n$);
- 3) Задан закон теплообмена в виде $q_2 = \alpha_2 (T_2 - T_c)$, где α_2 – коэффициент теплоотдачи; T_2 — температура стенки; T_c — температура среды (соответственно закон массообмена в виде $j_2 = \alpha_c (c_2 - c_c)$, где α_c – коэффициент массообмена). Кроме того, в начальный момент времени должны быть заданы значения всех искомых функций.

Для описания конвекции важной особенностью системы является то, что она не содержит так называемых эффектов гидростатической сжимаемости, а также акустических волн, проявляющихся в системе уравнений конвекции сжимаемого газа при наличии зависимости плотности от давления. Эти эффекты в приближении Буссинеска отфильтрованы благодаря тому, что рассчитываются отклонения давления и температуры (ρ', T') от своих статических значений. Это существенно при конструировании вычислительных методов. Вместе с тем следует иметь в виду, что при больших перепадах температуры, концентрации примесей или при больших изменениях величины гидростатического давления эти уравнения требуют корректировки.

Между уравнениями (2.48) и уравнениями Навье-Стокса конвекции сжимаемого газа имеются промежуточные математические модели, в которых либо учитывается изменение физических свойств - вязкости, теплопроводности и диффузии в рамках приближения Буссинеска, либо может быть выполнен более полный учет изменения плотности в зависимости от температуры и концентрации. Изложение этих вопросов выходит за рамки данной диссертации, в которой рассматривается численное решение классической системы уравнений Буссинеска (2.48).

Вводя масштабы для искомых величин и независимых переменных, можно привести систему (2.27) к следующему безразмерному виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + (V \nabla) V &= -\nabla \rho + \frac{1}{Re} \nabla V + n \left(\frac{Gr}{Re^2} \theta + \frac{Gr_c}{Re^2} C \right), \\ \operatorname{div} V &= 0, \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} + (V \nabla) \theta &= \frac{1}{Re Pr} \nabla \theta, \\ \frac{\partial C}{\partial t} + (V \nabla) C &= \frac{1}{Re Sc} \nabla C, \end{aligned} \quad (2.51)$$

В этих уравнениях содержатся безразмерные параметры, определенные по величинам, заданным условиями задачи: $Re = V_1 \cdot L / \nu$ - число Рейнольдса, $Gr = g \beta_T L^3 \Delta c / \nu^2$ - число Грасгофа, $Gr_c = g \beta_c L^3 \Delta c / \nu^2$ - концентрационное число Грасгофа, $Pr = \nu / \alpha$ - число Прандтля, $Sc = Pr_D = \nu / D$ - число Шмидта, или диффузионное число Прандтля, $\alpha = \lambda / \rho C_\rho$ - коэффициент температуропроводности.

Безразмерный аналог граничного условия (2.50) будет иметь вид

$$\frac{\partial U}{\partial n} = \frac{Mn}{Re Pr} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{Mn_c}{Re Sc} \cdot \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (2.52)$$

где $Mn = \sigma_0 \beta_{\sigma T} L \nabla T / \rho \nu \alpha$, $Mn_c = \sigma_0 \beta_{\sigma c} L \nabla T / \rho \nu D$ - число Марангони и концентрационное число Марангони, определяющие интенсивность поверхностных механизмов конвекции (термокапиллярной и концентрационно-капиллярной). Система (2.48) или ее безразмерный аналог (2.50) содержат описание широкого круга процессов и различных предельных режимов.

Наиболее простыми являются режимы переноса тепла (массы) молекулярными процессами теплопроводности (диффузии), реализующиеся в

неподвижной жидкости ($V \equiv 0$). Эти режимы являются асимптотическими для системы (2.7) при $Re \rightarrow 0$, $Gr \rightarrow 0$, $Gr_c \rightarrow 0$, $Mn \rightarrow 0$, $Mn_0 \rightarrow 0$.

При $Gr = Gr_c = Mn = Mn_c = 0$ уравнения (2.51) представляют уравнения Навье-Стокса однородной несжимаемой жидкости. Два последних уравнения (2.51) в этом случае описывают перенос тепла и массы движущейся жидкостью, при этом процессы тепло- и массообмена не оказывают влияния на движение.

В системе (2.51) содержится описание двух разновидностей естественной гравитационной конвекции: тепловой и концентрационной. Интенсивность тепловой конвекции определяется числом Грасгофа. Существенное значение при этом имеет число Прандтля, представляющее отношение толщин динамического и теплового пограничных слоев. В ряде случаев важную роль играет число Рэлея $Ra = GrPr$.

Интенсивность концентрационной конвекции определяется концентрационным числом Грасгофа, которое является аналогом числа Грасгофа. Важное значение при этом имеет диффузионное число Прандтля (число Шмидта), представляющее отношение толщин динамического и концентрационного пограничных слоев. Аналогом числа Рэлея в режиме концентрационной конвекции является концентрационное число Рэлея.

Число Марангони и концентрационное число Марангони являются аналогами чисел Рэлея и концентрационного числа Рэлея и определяют интенсивность поверхностных механизмов конвекции-термокапиллярной и концентрационно-капиллярной.

При численной реализации существенно, что в процессах естественной конвекции нет характерной скорости, заданной условиями задачи. В качестве масштаба скорости V_I для системы (2.48) может быть взята, например, величина v/L , имеющая размерность скорости. При этом число Рейнольдса, играющее в системе (2.51) роль масштабного фактора, следует положить равным единице. Безразмерная скорость в системе (2.51) VL/v является в этом случае числом Рейнольдса, отнесенным к местной скорости, а безразмерное

время равно vt / L^2 . Ниже используется также безразмерное время $F_0 = at / L^2$ (число Фурье).

Искомое решение системы (2.51) в виде поля скорости, температуры и концентрации примеси, которое обозначают $\Phi(V, \theta, C)$, определяется при заданной геометрии области γ и совокупности краевых условий γ_0 критериальной зависимостью вида.

$$\Phi = \Phi(x, y, z, Fo, Re, Ra, Mn, Mn_c Pr, Pr_D, \gamma, \gamma_0). \quad (2.53)$$

Это соотношение представляет параметрическую зависимость искомого решения, и его определение является главной задачей моделирования. Равенство (например, в модели и натуральных условиях) безразмерных параметров в правой части является, как известно, необходимым и достаточным условием подобия и условием как физического, так и математического моделирования. Найденная в результате моделирования критериальная функция Φ является основой управления процессами конвективного тепло- и массообмена в рамках принятой схематизации процесса [27].

Для рассмотренной выше модели «жидкости Буссинеска» эта частота может быть выражена в виде

$$N = \left(g\beta_T \frac{\partial T}{\partial z} + g\beta_c \frac{\partial c}{\partial z} \right)^{1/2}. \quad (2.54)$$

При этом масштаб безразмерного времени, соответствующий частоте плавучести, записывается в виде

$$T_N = t_N v / L^2 = (Gr + Gr_c)^{-1/2}. \quad (2.55)$$

где $t_N = l/N$; число Грасгофа и концентрационное число Грасгофа определены по вертикальным масштабам температуры и концентрации:

$$Gr = \frac{g\beta_T L^4}{\nu^2} \cdot \frac{\partial T}{\partial z}, \quad (2.56)$$

$$Gr = \frac{g\beta_c L^4}{\nu^2} \cdot \frac{\partial c}{\partial z}. \quad (2.57)$$

Комбинация числа Рейнольдса и числа Грасгофа дает число Ричардсона

$$Ri = gL / V^2 = Gr / Re^2 \beta_T \Delta T \quad (2.58)$$

или число Фруда

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{Re}{\sqrt{Gr / \beta_T \Delta T}}. \quad (2.59)$$

Уравнения Навье-Стокса, составляющие основу уравнений конвекции (2.48), (2.51), обладают рядом специфических особенностей, которые проявляются в численной реализации независимо от формы их записи. Одной из особенностей является пространственно-эллиптический характер решений, обусловленный влиянием вязкости во всем поле течения. В связи с этим для решения требуется использовать типичные для эллиптических уравнений методы. В отличие от уравнений пограничного слоя при этом требуется постановка граничных условий на всех границах рассматриваемой области [28; 29].

В системе уравнений Навье-Стокса имеется малый параметр при старшей производной $e = l/Re$, изменению которого соответствует существенное

изменение гладкости решения. Это связано с появлением у стенок при росте числа Re пограничного слоя, толщина которого пропорциональна величине $1/\sqrt{Re}$.

При больших числах Re наблюдается неупорядоченное, хаотическое движение жидкости, называемое турбулентным движением, при исследовании которого представляет интерес описание средних пространственно-временных характеристик. Переход из ламинарного режима течения в турбулентный в круглой трубе происходит при числе $Re \approx 2 \cdot 10^3$.

При разработке методов численного решения уравнений типа (2.51) главной задачей было описать с достаточной для практических целей точностью поля искомых величин в широком диапазоне определяющих параметров [10].

Конвекция рассматривается как граничное условие (3-го рода) на примыкающих к границе (модели) твердотельных или оболочечных элементах. В Модели указаны коэффициент теплоотдачи и температура воздуха, охватывающую (граничную) поверхность. ANSYS рассчитывает конвективный тепловой поток через эту поверхность.

Рассматриваемая задача теплопереноса в установке фильтрации представлена на рисунке 2.7. Исследуемый элемент состоит из пяти элементов, имеющих разные теплофизические характеристики. Температура источника тепловыделения остается постоянной в течение всего процесса. Горизонтальные стенки ($x=0$, $x=Lx$), вертикально ($y=0$, $y=Ly$) и в глубину ($z=0$, $z=Lz$) конечной толщины.

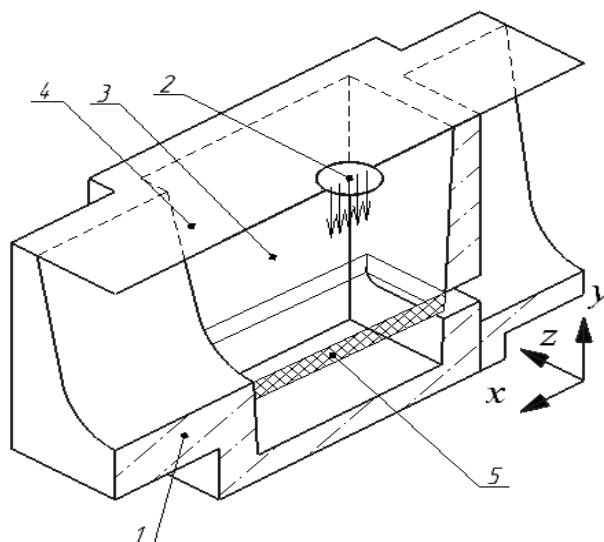


Рисунок 2.7 – Изометрия модели в разрезе по оси x с нагревательным элементом расположенным вертикально (1 – огнеупорный материал; 2 – источник тепла; 3 – газовая полость; 4 – теплоизоляционный материал; 5 – пенокерамический фильтр)

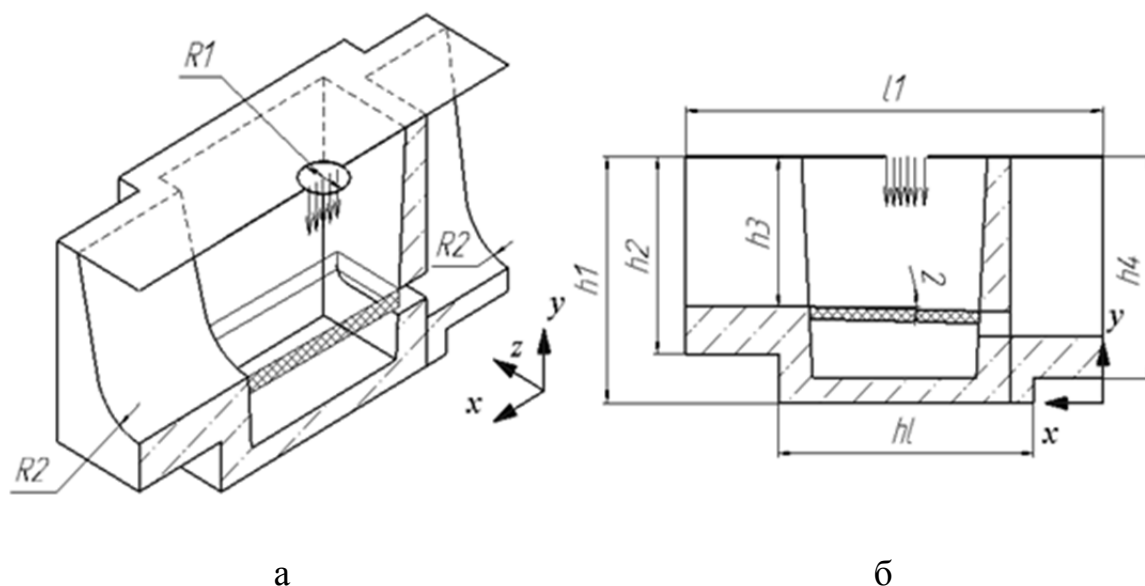


Рисунок 2.8 – Геометрические размеры модели

а) – Изометрия модели в разрезе по оси x ; б) – Вид справа в разрезе

Таблица 2.1 – Основные размеры расчетной области

Наименования	Обозначения	Единица измерения	Величина
Длина расчетной модели	$l1$	мм	900
Длина фильтрбокса	$l2$	мм	550
Глубина расчетной модели	lz	мм	500
Радиус источника тепла	$R1$	мм	45
Радиус огнеупорного материала	$R2$	мм	102
Высота расчетной модели	$h1$	мм	500
Высота огнеупорного материала	$h2$	мм	450
Высота до пенокерамического фильтра	$h3$	мм	300
Высота огнеупорного материала	$h4$	мм	450

2.5 Определение размера пенокерамического фильтра

Скорость расплава через фильтр должна лежать в определенных пределах. Если скорость расплава слишком высокая это может снизить эффективность фильтрации, т.к. удерживаемые частицы могут быть вымыты из фильтра.

Основываясь на теории фильтрации, принимают, что скорость металла через фильтр должна лежать в интервале 10 – 19 мм/с. Фильтр должен выбираться соответственно.

В установке фильтрации используется пенокерамические фильтры SIVEX[®] компании Pyrotek. В таблице 2.2 приведены справочные данные для фильтров различного размера.

Таблица 2.2 – Эффективная площадь фильтрации

Размер фильтра (дюйм)	Эффективная площадь фильтрации м ²
7x7x2	0.0213
9x9x2	0.0387
12x12x2	0.0745
15x15x2	0.122
17x17x2	0.160
20x20x2	0.227
23x23x2	0.305

Для определения размера фильтра используется формула:

$$V_f = \frac{V_m}{0,85 \cdot \gamma \cdot S},$$

где V_f – скорость металла через фильтр;

V_m – скорость потока металла,

0,85 – объемная доля пор в фильтре;

γ – удельный вес жидкого алюминия, принимаем равным 2,37.

S – эффективная площадь фильтрации.

Предварительно, для расчета, был выбран фильтр размером 15x15 дюймов с эффективной площадью фильтрации 0,122 м².

При литье на одну литейную машину 200 кг/мин

$$V_f = \underline{7,64 \text{ мм/с}};$$

При литье на две литейные машины 370 кг/мин

$$V_f = \underline{8,75 \text{ мм/с}}$$

Из расчета видно, что при литье на две литейные машины скорость через фильтр выше, чем рекомендуется.

Выбирав фильтр размером 12x12 дюймов с эффективной площадью фильтрации $0,0745 \text{ мм}^2$ и находим скорость металла через фильтр:

при литье 200 кг/мин

$$V_f = \underline{10,34 \text{ мм/с}};$$

при литье 370 кг/мин

$$V_f = \underline{19,13 \text{ мм/с}}$$

Исходя из расчета рекомендуется установка фильтра размером 12x12 дюймов.

2.6 Результаты математического моделирования и их анализ

Для решения тепловой задачи камеры фильтрации с установленным пеночероамическим фильтром удобнее всего использовать комбинацию программного обеспечения ANSYS Mechanical ADPL для построения (импорта) моделей, наложения сетки, решения и ANSYS CFX для задания свойств пористости ПКФ [30].

При прогреве фильтрэлемента входной канал фильтрбокса закрывается шиберной задвижкой из стали. Практически весь, нагретый до $800 \text{ }^\circ\text{C}$, воздух поступающий в корпус фильтрбокса проходит через фильтрующий элемент. Это позволяет поднять эффективность прогрева фильтрэлемента с помощью электрического воздушного нагревателя. Также используя данный прием

возможно удаления большей части алюминия из фильтрэлемента по завершению процесса литья. Это позволит снизить количество алюминия утрачиваемого безвозвратно с отработавшим фильтрэлементом.

На рисунках 2.9 и 2.10 представлен процесс разогрева камеры фильтрации в течение 30 минут. На рисунке 2.11 видно, что часть теплового потока проходит еще через сливной картридж в систему желобов попутно прогревая их и сливные леточные отверстия. Средняя температура ПКФ не превышает 400 °С, но для разогрева до рекомендуемой средней температуры 650 °С время нагрева составит около 1 часа. Это большой промежуток времени для предварительного нагрева между циклами литья. Очевидно, что мощности нагревателя не достаточно для поддержания темпа нагрева. Поэтому мощность нагревателя по предварительным расчетам следует увеличить до 30 кВт. Оптимальным станет выбор 3 однофазных Leister 10 кВт для интенсивного разогрева картриджа до температуры 650 °С. Результаты расчета приведены на рисунке 2.12. За промежуток времени в 40 минут камера фильтрации прогревается до температуры выше 600 °С.

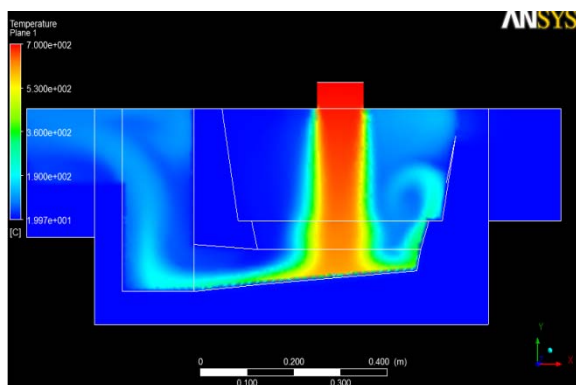


Рисунок 2.9 – Распределение температур вначале прогрева Leister

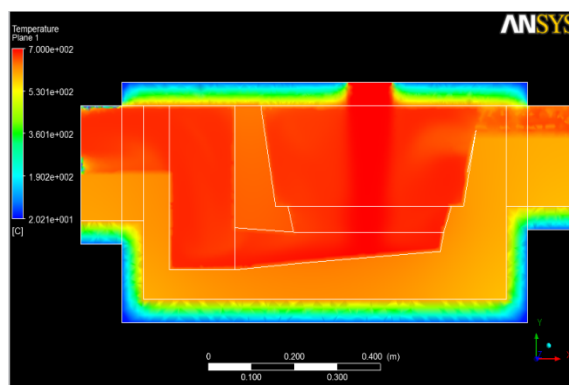


Рисунок 2.10 – Распределение температур через 30 минут прогрева Leister

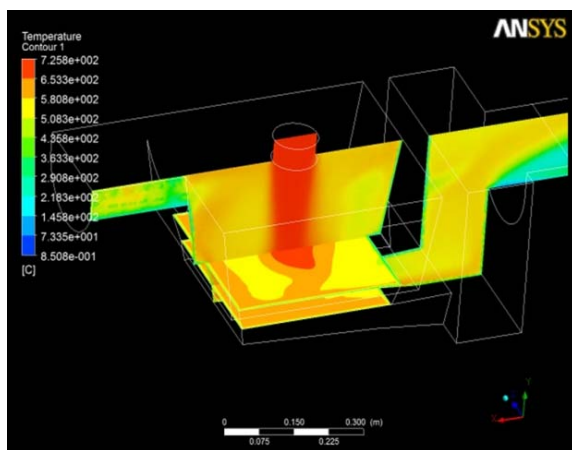


Рисунок 2.11 – Тепловая энергия от одного конвекционного нагревателя Laister мощностью 15-17 кВт

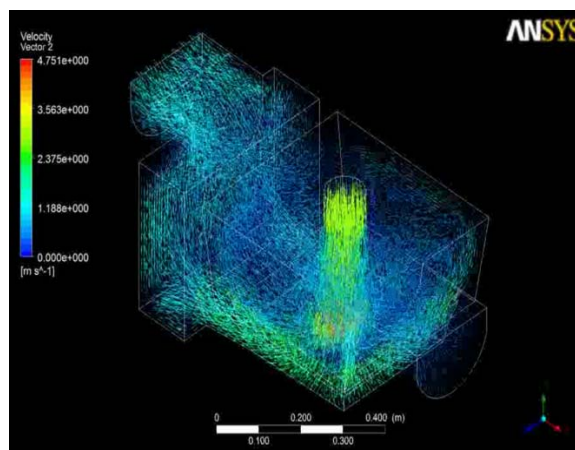


Рисунок 2.12 – Поле скоростей в камере фильтрации при прогреве одним конвекционным нагревателем Laister мощностью 15-17 кВт

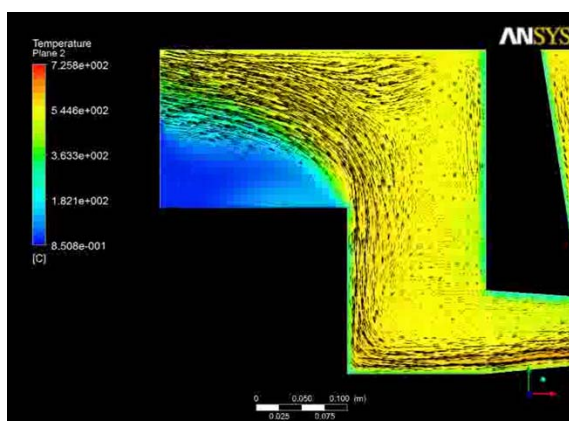


Рисунок 2.13 – Потри теплового воздуха на выходе из картриджа

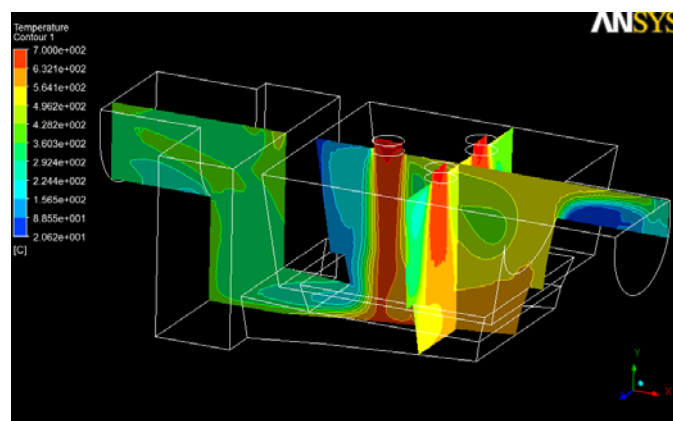


Рисунок 2.14 – Нагрев тремя 1ф Leister (3×10 кВт)

Использование 3 однофазных Leister так же является более ремонтпригодным. В случае выхода из строя одного Leister 10 кВт, установка останется работоспособной до замены нагревателя, чем в случае с одним трехфазным нагревателем.

Выводы по главе

1. Рассмотрена теория математического моделирования теплофизических процессов металлургических установок.
2. Описана и построена математическая модель тепловых полей и поля скоростей конвективного нагрева установки фильтрации с учетом постановки задачи и принятыми допущениями.
3. Из расчетов математической модели выявлены следующие выводы: конвективный нагреватель Leister достаточно эффективно прогревает камеру фильтрации и ПКФ по всему объему. Один нагреватель 15-17 кВт прогревает камеру фильтрации до 400°C за 30 минут, за 1 час до 650°C. Замена на три однофазных нагревателя сокращает время нагрева практически в 2 раза.

3 Описание промышленной установки

3.1 Технология фильтрации и фильтрующий бокс

Общий вид разработанной установки фильтрации для реализации технологии очистки с картриджами 12 дюймов представлен на рисунке 3.1.

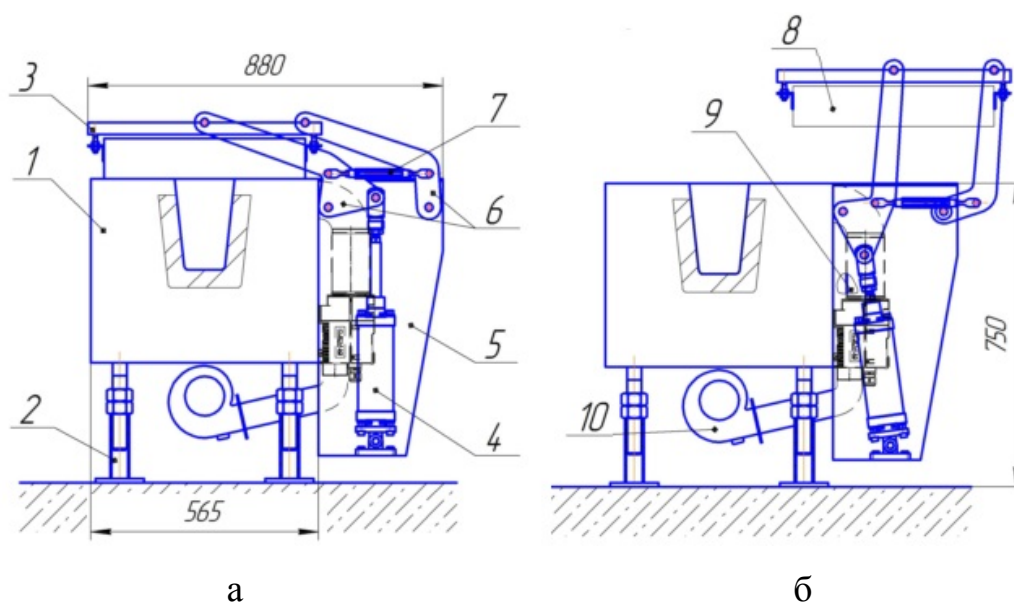


Рисунок 3.1 – Общий вид фильтрующего бокса с опущенной (а) и поднятой крышкой (б)

Фильтрующий бокс состоит из металлического кожуха (поз. 1) регулируемого по высоте с помощью четырех регулируемых ножек (поз. 2). Внутри кожуха расположен керамический картридж со сменным пенокерамическим фильтром размером 12 дюймов (305x305 мм, толщиной 50мм). Стенка, разделяющая части картриджа с алюминием до и после фильтрации, имеет толщину 40 мм. Пенокерамический фильтр и горизонтальная перегородка картриджа выполнены с уклоном к входу 30 для того, чтобы воздух выходил из под фильтрующего элемента. Между картриджем и боковыми стенками кожуха зазор 45 мм, между картриджем и нижней стенкой – 55 мм. Для удаления картриджа, горизонтальная часть

картриджа имеет полки по 30 мм, а его боковые стенки выполнены с уклоном 30. Отверстия для слива остатков алюминия в конце литья выполнены с двух сторон картриджа, что исключает необходимость “правого” и “левого” исполнения самого картриджа в отличие от металлоконструкции фильтрующего бокса. Картридж выполняется из двух частей по длине, которые стыкуются при монтаже картриджа в металлоконструкцию фильтрующего бокса. Технические характеристики фильтр бокса УФП12 представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Технические характеристики фильтрующего устройства

Наименование параметра	Значение
Размеры пенокерамического фильтра (В×Ш×Д), мм	50 × 305±2 × 305±2
Эффективная площадь фильтра, м ²	0,07
Тонкость фильтрации, ррi	30
Расход алюминия, кг/мин	90 ÷ 172 (200)
Количество циклов литья фильтра, в сутки	6-7
Максимальная производительность фильтрации, тонн в час	12
Объем фильтрации алюминия, тонн в сутки	80 ÷ 100
Температура металла внутри бокса во время фильтрации, задаваемая оператором с пульта управления, °С	690 ÷ 750
Температура рабочего пространства в камере, °С	800 ÷ 900
Точность поддержания температуры расплава на выходе из фильтра, °С	±5

Окончание таблицы 3.1

Наименование параметра	Значение
Размеры фильтрующего бокса (В×Ш×Д), не более , мм	800±100 × 700 × 900
Масса фильтрующего бокса, не более, кг	560
Температура кожуха, не более, °С	40
Защитное покрытие металлоконструкции	Серая краска в 2 слоя
Рабочая температура защитного покрытия (длительно), °С	<400
Нормативный срок службы устройства с даты ввода в промышленную эксплуатацию, лет	10

Отличительной особенностью разработанного фильтра является то, что фильтр стоит в потоке и позволяет в конце литья и при аварийном режиме убирать пробку выше фильтрующего элемента и сливать расплав напрямую в сливной лоток. Металлоконструкция фильтр бокса окрашена двумя слоями теплостойкой серой краски (до 400 °С) и ее внешняя температура кожуха не более 40 °С в силу наличия цельнолитого огнеупорного картриджа из огнеупорного бетона. Поставщик бетона ООО “Фирма “Сплав” (г. Иркутск). В комплект поставки входит система желобов от рабочей лётки миксера до устройства разлива литейного конвейера через фильтр-бокс, включая желоба слива расплава из фильтр-бокса до сливной емкости (емкость не поставляется). Желоба имеют фланцевое соединение по длине. При поставке металлоконструкции желобов фланцы крепятся на прихватках для корректировки соединения по месту при монтаже желобов.

Для исключения обжигающего воздействия нагревательных элементов крышке фильтр-бокса (поз. 3) компании Kanthal (Швеция), посредством рычажного механизма, открывается излучающей поверхностью направленной в

пол. Привод подъема – пневмоцилиндр (поз. 4), G3/8 (– 10 0С + 400С) с гофрой для цилиндра (диам. 80, ход 151-200 мм) с датчиками нижнего и верхнего положения – поставщик SMC Пневматикс. Пневмоцилиндр расположен в защитном кожухе (поз. 5) для предотвращения механических. Подъем крышки (поз. 3) задается рычагами (поз. 6), которые регулируются (настраиваются) с помощью талрепа (поз. 7). Крышка (поз. 3) позиционируется относительно картриджа и металлоконструкции фильтра с помощью регулировочных болтов. Пневмоцилиндры запитаны от источника сжатого воздуха 4-6 кг/см², 200л/мин, точка росы – 30 °С. Пневмоцилиндры закрыты кожухом для защиты от тепловых и механических воздействий.

3.2 Разработка технического проекта фильтрующего бокса

Система прогрева картриджа и фильтрующего элемента – комбинированная (защищенные радиационные нагреватели в крышке на время литья и конвективный нагрев горячим воздухом на время подготовки литья). Для прогрева фильтрэлемента в конструкции фильтрбокса предусмотрен электрический воздушный нагреватель (поз. 9) работающий в паре с вентилятором высокого давления (поз. 10). Это позволит прогреть фильтрэлемент до рабочей температуры 700-750 0С менее чем за 20 минут. Поставщик конвективного вентилятора и нагревателя – Leister. При этом используется последняя разработка Leister – нагреватель, работающий на поток воздуха до 800 °С и мощностью 10 кВт. Система конвективного нагрева закрыта кожухом для защиты от механических воздействий. Нагретый воздух от нагревателя Leister подается по воздуховоду из термостойкой нержавеющей стали в отверстие в металлоконструкции и картридже, которое находится выше критического уровня алюминия, чтобы расплав не попал в нагреватель при переливе. Критический уровень определен выстой аварийной пробки на выходе пенокерамического фильтра.

При прогреве фильтрэлемента входной канал фильтрбокса закрывается шиберной задвижкой из стали 12x18n10t (на чертеже не показана). Практически весь, нагретый до 800 °С, воздух поступающий в корпус фильтрбокса проходит через фильтрующий элемент. Это позволяет поднять эффективность прогрева фильтрэлемента с помощью электрического воздушного нагревателя. Также используя данный прием возможно удаления большей части алюминия из фильтрэлемента по завершению процесса литья. Это позволит снизить количество алюминия утрачиваемого безвозвратно с отработавшим фильтрэлементом. Технические характеристики оборудования УФП12 приведены в таблице 3.2.

Для автоматизации работы фильтрующего бокса разработана АСУ ТП. На лицевой основной панели пульта располагаются органы управления и автоматический выключатель ВА1. Кроме основного пульта управления (рисунок 3.3) есть вспомогательный пульт управления (рисунок 3.4) с кнопками “подъем крышки” и “разогрев фильтра”, который расположен непосредственно вблизи фильтрующего бокса.

В основе АСУ ТП фильтр бокса заложен логический контроллер, который осуществляет управление регулятором мощности и бесконтактным коммутатором. Контроль и регулирование мощности сводового нагревателя выполняют с помощью измерительного регулятора (ТРН). Тиристорный коммутатор выполняет роль ключа для подачи электропитания устройство предварительного подогрева фильтрующего бокса (В1). В1 включают за 20 мин до начала литья нажатием кнопки “разогрев фильтра” (на панели основного ПУ или вспомогательного ПУ). Для подъема крышки фильтр бокса используют рычажную систему с пневматическими цилиндрами. За подъем опускание отвечает пневмораспределитель, управляемый напрямую от контроллера. Контроль положения крышки выполняют с помощью герконов (верхнего и нижнего положения штока). Герконы располагают на пневматических цилиндрах. Для сигнализации текущего состояния фильтрующего бокса

используют свето-звуковую колонну (СЗК). Дополнительно контроллер выполняет архивацию данных с основных термопар на внешнюю память.

Таблица 3.2. Технические характеристики УФП12

Наименование параметра	Значение
Привод подъема крышки	Пневматический
Ход штока пневмоцилиндра (SMC), мм	160
Диаметр/длина хода гофры для штока пневоцилиндра	80/200
Допустимый диапазон работы пневмоцилиндра, °С	- 10 ÷ + 40
Допустимый диапазон работы аппаратуры, °С	- 40 ÷ + 80
Наименование параметра	Значение
Точка росы сжатого воздуха, °С	- 30
Допустимое давление сжатого воздуха, кг/см ²	4 ÷ 6
Допустимый расход сжатого воздуха, л/мин	200
Огнеупорный картридж под пенокерамический фильтр	Цельнолитой
Материал	огнеупорный бетон
Минимальный срок службы огнеупорного картриджа, месяцев	6
Предварительный нагрев картриджа и фильтра	Конвективный
Температура нагрева фильтрующего элемента, °С	750
Максимальная температура нагретого воздуха, °С	800
Время нагрева фильтрующего элемента, минут	20
Установленная мощность, кВт	10,25
Марка вентилятора	RUBUST (Leister)
Давление вентилятора, кПа	8
Расход нагретого воздуха, л/минуту	1 200
Электрическое питание, В	3 × 400

Окончание таблицы 3.2

Наименование параметра	Значение
Подогрев расплава в процессе литья	Радиационный
Материал стержня	KANTHAL АРМ-10/30
Защитный экран от брызг алюминия	Чугун
Размеры поверхности нагревателя, мм	375 × 375
Максимальная температура на поверхности нагревателя, °С	900
Номинальное напряжение, В	3 × 400
Мощность нагревателя (регулируемая), кВт	10
АСУ ТП (управление температурой и крышкой)	Микроконтроллерная
Рабочая температура контроллера, °С	–35 ÷ +85
Класс защиты шкафа с контроллером	IP54
Период записи данных в память SD-карты, секунд	5
Формат записи архивных данных	ФБ1_10_40(10_08_14)_11_40(10_08_14).csv
Период создания нового архива данных, часов	1
Срок хранения архивных данных, лет	2

Общий вид модели фильтр в сборе представлен на рисунке 3.2. Фильтр имеет подъемную крышку 1 с пневматическим приводом 2. В крышке установлены карбид-кремниевые нагревательные элементы. Они создают необходимую тепловую мощность для компенсации тепловых потерь расплава. Для контроля температуры нагревателей в крышке установлена термопара 5. Для регулирования тепловой мощности нагревателей используют термопару 6, измеряющую температуру внутри фильтра. Для предварительного подогрева пенoкeрaмичeского фильтра установлен промышленный фен 2 (leister 5000) с вентилятором высокого давления 4 (Robust). Для оперативного обслуживания

фильтра предусмотрен автоматический подъем крышки приводом пневматического цилиндра 3.

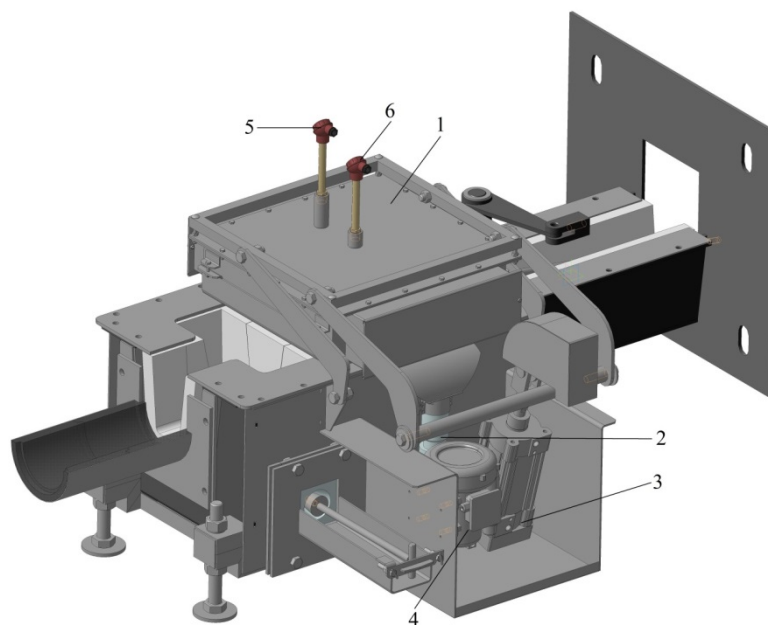


Рисунок 3.2 – Модель фильтрующего бокса

Для обеспечения работоспособности установки фильтрации дополнительно поставляются основной и вспомогательный пульта управления (рисунок 3.3 и 3.4). Основной пульт управления используют для размещения коммутационной аппаратуры, ПЛК, контрольно-измерительной аппаратуры и т.д. На лицевой панели размещены индикационные лампы, кнопки, амперметры и панель оператора.

Вспомогательный пульт управления используют для оперативного обслуживания фильтра и включения режима подогрева. На лицевой панели расположен двухпозиционный переключатель для подъема/опускания крышки. Кнопка-лампа «ПОДОГРЕВ» для включения режима предварительного подогрева промышленным феном.



Рисунок 3.3 – Пульт управления фильтрующим боксом

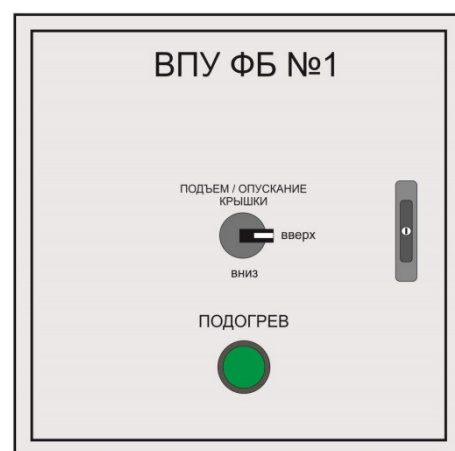


Рисунок 3.4 – Вспомогательный пульт управления

В основной пульт управления А1 выполняют электрический ввод 3х380 В. В пульте расположен тиристорный регулятор мощности от которого осуществляют электропитание нагревателей сопротивления расположенных в крышке фильтра А3. С пульта управления выходят электрические контакты для питания системы предварительного подогрева А4. Для контроля работы нагрева крышки ФБ в ней установлены термопары В3 и В4. Термопары не имеют встроенных нормирующих преобразователей, поэтому к головкам подключают термокомпенсационный провод. Этот провод подключают к преобразователю НРТ1 установленным в основном пульте управления.

Термопара В3 является резервной, для нее предусмотрен дополнительный преобразователь НПТ1. Также по осуществляется контроль по термопаре печи В2, которая имеет встроенный нормирующий преобразователь.

Для подъема крышки на ФБ установлен пневмоцилиндр с превмораспределителем. При отсутствии управляющего сигнала на пневмоцилиндре крышка ФБ прижимается с усилием. А при подаче сигнала крышка открывается. Для контроля полного открытия/закрытия на пневмоцилиндре установлены герконовые концевики.

3.3 Автоматизация электропитания и построение АСУ ТП установки фильтрации

Для автоматизации электропитания фильтр-бокса принято решение применить промышленный контроллер Siemens. Электроснабжение выполнено от цехового распределительного пункта РП-6. Силовые и сигнальные кабели выполнены проводами, устойчивыми к тепловым перегрузкам и проложены в трубах. Важнейшие модули А1 и А3, А4 электрической схемы комплекса показаны на рисунках 3.5 и 3.6.

Фильтрующий бокс 3 расположен на площадке в непосредственной близости от миксера сопротивления. Присоединение производят с помощью транспортировочных каналов. Выходной конец канала фильтра выходит к литейному конвейеру для выполнения разливки. Вспомогательный пульт управления 4 расположен на стенке печи в зоне обслуживания литейщика. Основной пульт управления 1 удален от фильтра и расположен в стороне.

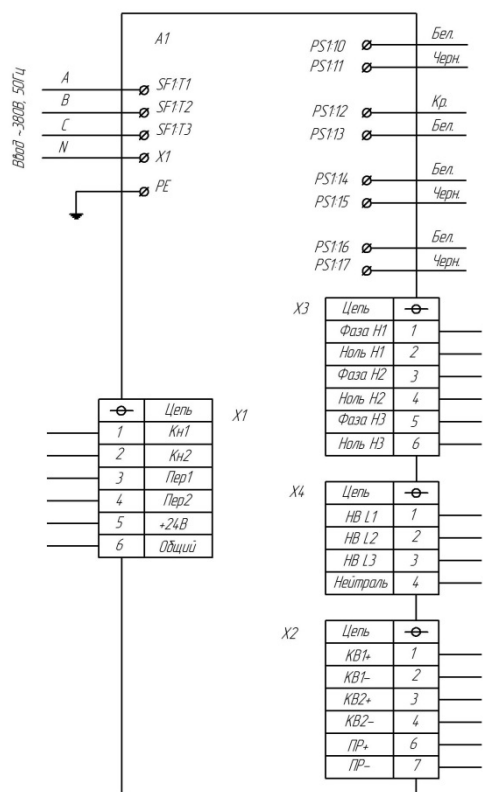


Рисунок 3.5 – Модуль А1
электрической схемы комплекса

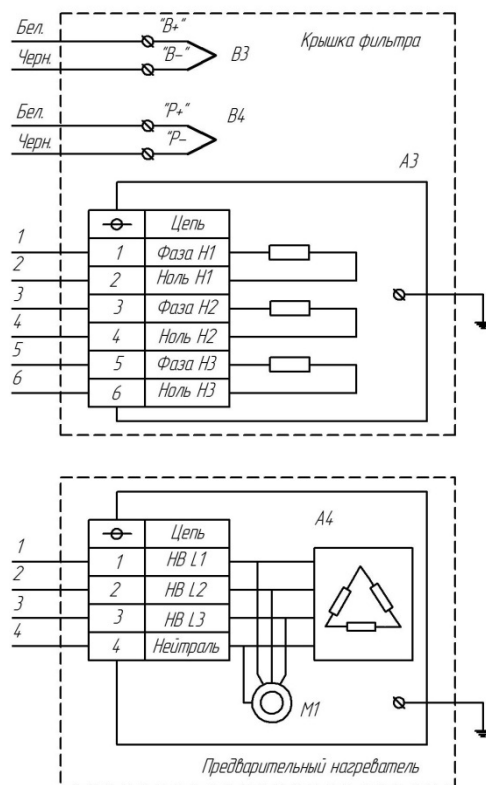


Рисунок 3.6 – Модули А3 и А4
электрической схемы комплекса

Алгоритм работы комплекса. Запуск и работа комплекса. Для запуска в работу комплекса необходимо включить общий автомат QF1 и отжать кнопку-грибок «АВАРИЙНЫЙ ОСТАНОВ». Должна появиться индикация лампы «СЕТЬ». Затем следует включить автоматы QF2, 3, 4, 5, 6. Должна появиться «желтая» индикация на светозвуковой колонне.

Для запуска нагрева следует нажать кнопку-лампу «ПУСК/СТОП». После чего ПЛК должен выполнить контроль работоспособности тиристорного регулятора W5. Должны прийти дискретные сигналы DI4 (работает основной тиристорный регулятор) или DI5 (резервный основной тиристорный регулятор). Затем ПЛК гасит «желтый» свет светозвуковой колонны и зажигает «зеленый», а также кнопку-лампу «ПУСК/СТОП». Затем происходит постепенное наращивание управляющего сигнала на соответствующем включенном тиристорном регуляторе. Наращивание производится с регулированием по

обратной связи от двух термопар В3 и В4. Причем при достижении температуры В3 управляющий сигнал уменьшается до минимального (по сути релейный принцип). А относительно В4 производится ПИ-регулирование относительно заданной температуры.

Все допуски по температурам задаются пользователями через панель оператора. Работа основного режима может быть прекращена путем нажатия кнопки-лампы «ПУСК/СТОП» или кнопки-грибка «Аварийный останов». При этом управляющие сигналы тиристорного регулятора уменьшают до минимального значения, гаснет лампа-кнопка «ПУСК/СТОП» и «зеленый» сигнал светозвуковой колонны, а загорается «зеленый».

Включение предварительного подогрева. До начала литья металла необходимо провести предварительный подогрев пенокерамического фильтра. Для этого необходимо нажать кнопку-лампу «ПОДОГРЕВ», которая в последствии загорается на основном и вспомогательных пультах управления. ПЛК коммутирует контактор КМ4, запуская Leister 5000 и вентилятор высокого давления М1. Длительность подогрева по умолчанию составляет 20 минут, но может редактироваться пользователем через панель оператора. После истечения времени подогрева, контактор КМ4 отключается, а лампа-кнопка «ПОДОГРЕВ» гаснет. Режим подогрева можно остановить досрочно, если повторно нажать кнопку-лампу «ПОДОГРЕВ». Следует учитывать, что работа комплекса в основном режиме нагрева и в режиме подогрева производится независимо.

Обслуживание фильтра. Для обслуживания фильтра предусмотрена система пневматического подъема крышки. Для этого на выносном пульте управления следует перевести кулачковый переключатель в S3 в положение 1. После чего ПЛК подаст управляющий сигнал на пневмораспределитель П1. Пневмоцилиндр начнет поднимать крышку в верхнее положение. Как только разомкнут концевой выключатель SK2 (нижнее положение) режим нагрева и подогрева автоматически останавливается, гаснет соответствующая индикация,

загорается «желтый» свет светозвуковой колонны. После закрытия крышки и замыкания SK2 прерванные режимы возобновляются.

Контроль, предупреждения и аварийные ситуации. В процессе работы могут выходить из строя нагревательные элементы. Контроль состояния нагревателей производится посредством реле контроля тока РКТ1, которые установлены в трех ветвях нагревателей. Если релейный контакт замкнут, то ветвь исправна. ПЛК зажигает соответствующую лампу «Ветвь». Если контакт размыкается, то соответствующая лампа гаснет, начинает работать сирена и индицироваться мигающий «красный» свет светозвуковой колонны. Сигнализация носит только информационный характер и на работу других ветвей не влияет. Выход в основной рабочий режим может быть запрещен если будут неисправны все три ветви нагревателей. Вэтом случае красная сигнализация горит пока хотя бы одна ветвь не будет восстановлена.

В основном пульте управления установлены основной и резервный тиристорные регуляторы. Контроль работоспособности одного или другого выполняется посредством релейных контактов «Основной» и «Резерв». В работе может находиться только один из регуляторов, в противном случае начинает работать сирена и индицироваться «красный» свет светозвуковой колонны. А подача управляющих сигналов блокируется.

Если во время подъема/опускания крышки через 1 минуту не сработал соответствующий концевой выключатель, то режим считается аварийным. Начинает работать сирена и индицироваться мигающий «красный» свет светозвуковой колонны.

Звуковая сигнализация может быть отключена кратковременным нажатием кнопки «СБРОС».

Все аварийные ситуации прописаны в руководстве по эксплуатации и имеют индивидуальную кодировку.

Для проверки работоспособности индикации пультов должно быть предусмотрена проверка путем нажатия кнопки «СБРОС» в течении 5 с.

Значения всех дискретных и аналоговых каналов должны быть записаны на флеш-карту во временной шкале с задаваемым шагом через панель оператора.

Выполнение всех режимов и индикация с расшифровкой аварий должны быть записаны на флеш-карте и отражены на панели оператора.

Панель оператора. Используют для настройки комплекса и выполнения индикации параметров.

Стартовой страницей является мастер (рисунок 3.7). Для перехода на следующую страницу необходимо нажать кнопку *МАСТЕР*. На второй странице расположены кнопки *Настройка* и *Индикация*, представляющие собой соответствующие разделы (рисунок 3.8).

После нажатия кнопки *Настройка* происходит переход на страницу ввода пароля для проверки уровня доступа пользователя (рисунок 3.9). В случае правильного ввода пароля появляется кнопка *ВВОД*.



Рисунок 3.7 – Раздел «Мастер»



Рисунок 3.8 – Кнопки «настройка» и «индикация»

Нажатие которой позволяет перейти в окно настройки (рисунок 3.10). Для настройки доступны 5 параметров: 1:01 – Температура 1; 1:02 - Температура 2; 1:03 Температура 3; 1:04 Температура 4; 1:05, Время подогрева. Позиции для

флага напротив первых четырех параметров означают возможность выбора температуры относительно которой будет выполняться регулирование.



Рисунок 3.9 – Ввод пароля



Рисунок 3.10 – Настройка

Окно с примером редактирования параметров приведено на рисунке 3.11. Для сохранения следует нажать кнопку *сохранить*.



Рисунок 3.11 – Редактирование параметров



Рисунок 3.12 – Индикация «аварийный останов»

В разделе индикация (рисунок 3.12) отражаются текущие параметры системы: 2:01 Температура 1; 2:02 Температура 2; 2:03 Температура 3; 2:04 Температура 4; 2:05 Ток ветви 1; 2:06 Ток ветви 2; 2:07 Ток ветви 3; 2:08 Время подогрева; 2:09 Код ошибок.



Рисунок 3.13 - Индикация «комплекс в работе»

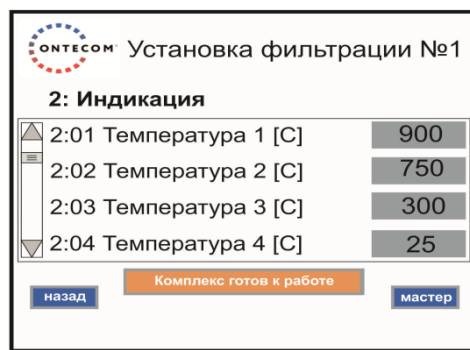


Рисунок 3.14 –Индикация «комплекс готов к работе»

Для перемещения назад на страницу используют кнопку *назад*. Для возврата в начало – кнопку *мастер*.

3.4 Экспериментальные данные

Установка фильтрации внедрена в литейном отделении №1 ДЛП ОАО «РУСАЛ-Красноярск». В рабочем режиме литья через установку фильтрации были получены экспериментальные данные радиационного нагрева в обычном режиме и в режиме изменения температуры уставки нагревателей в крышке. По результатам видна работа карбидокремниевых нагревателей, выравнивание температуры расплава в фильтре (рисунок 3.15).

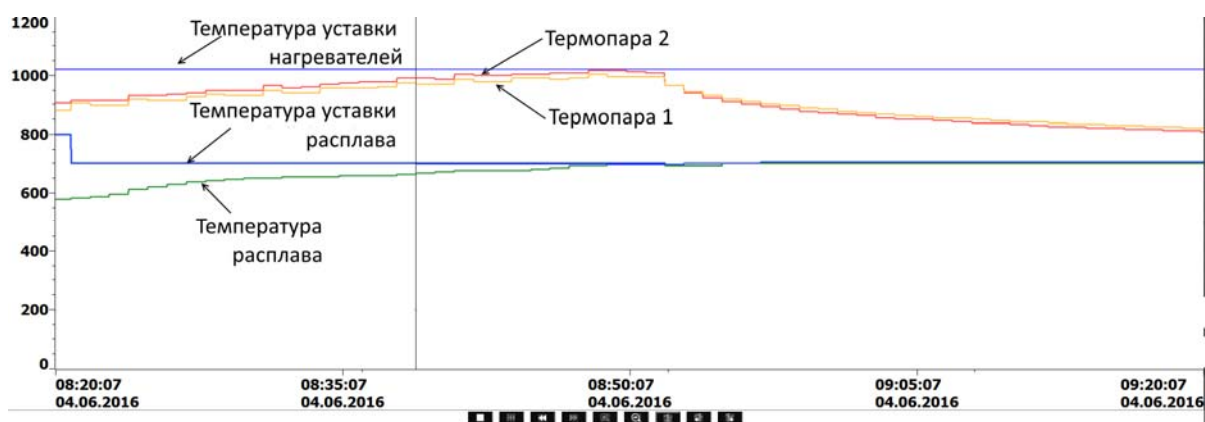


Рисунок 3.15 – Экспериментальные данные радиационного нагрева во время литья

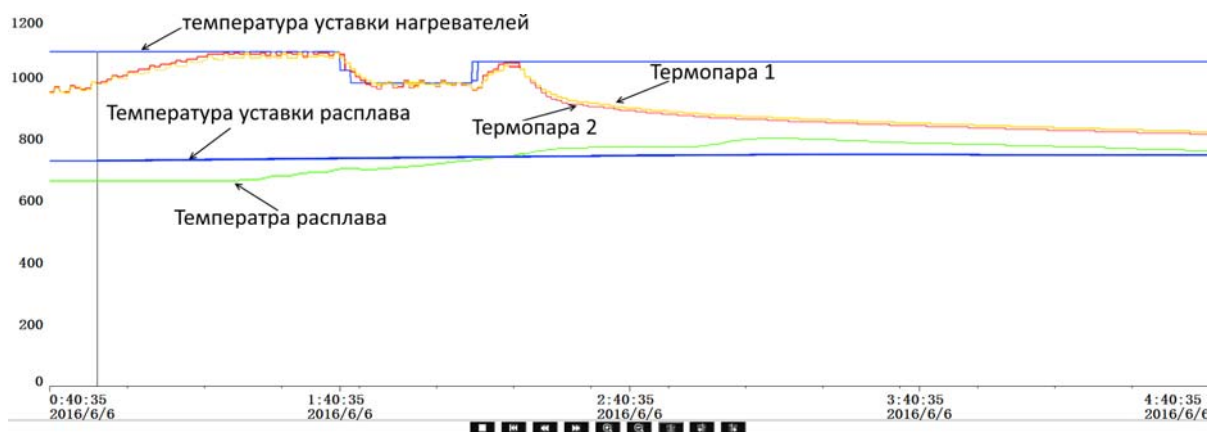


Рисунок 3.16 – Экспериментальные данные радиационного нагрева во время литья с регулированием температуры уставки нагревателей

На рисунке 3.16 показан результат регулирования заданной температуры радиационных нагревателей, видно, что при снижении температуры уставки нагреватели начинают отключаться, что может предотвратить перегрев зеркала металла. В обратном же случае, нагреватели включаются в тот же момент и поддерживают температуру проходящего расплава.

Выводы по главе

1. Проведено техническое проектирование полноценного фильтрационного бокса с пенокерамическим фильтром 12 дюймов для установки на раздаточный миксер литейного конвейера. Фильтр предназначен для очистки от твердых включений и дополнительной компенсации тепловых потерь в расплаве.

2. В основе конструкции фильтра заложены самые современные карбидокремниевые трубчатые нагреватели установленные в крышке. Для защиты нагревательных элементов от агрессивных газов установлена керамическая защитная пластина. Для исключения термического поражения обслуживающего персонала, разработана рычажная система параллельного открывания крышки с применением пневматического привода.

3. Для выполнения оперативного контроля и управления была разработана система АСУ ТП на основе логического контроллера Siemens Simantic S1200. Ее функциональные возможности позволяют выполнять контроль состояния нагревательных элементов, тиристорных регуляторов и системы управления. Автоматическое формирование рабочего архива с текущими контрольными параметрами и информацией об ошибках позволяют оперативно находить источник неисправностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучены возможные методы фильтрации алюминия от неметаллических включений. Произведен поиск существующих аналогов установки, анализ преимуществ и недостатков, способов их исследования, проведен сравнительный анализ свойств основных типов фильтров, выявлены пути дальнейшего совершенствования технической системы.

2. На основании первой главы можно сделать вывод о том, что наиболее эффективную фильтрацию алюминия может обеспечить пенокерамический фильтр. Существующие установки фильтрации не могут обеспечить одинаково эффективный предварительный нагрев и поддержание температуры расплава при литье, поэтому разработка установки с комбинированным нагревом является актуальной задачей.

3. Рассмотрена теория математического моделирования теплофизических процессов металлургических установок. Описана и построена математическая модель тепловых полей и поля скоростей конвективного нагрева установки фильтрации с учетом постановки задачи и принятыми допущениями.

4. Из расчетов математической модели выявлены следующие выводы: конвективный нагреватель Leister достаточно эффективно прогревает камеру фильтрации и ПКФ по всему объему. Один нагреватель 15-17 кВт прогревает камеру фильтрации до 400°C за 30 минут, за 1 час до 650°C. Замена на три однофазных нагревателя сокращает время нагрева практически в 2 раза.

5. Выполнено техническое проектирование фильтрационного бокса с пенокерамическим фильтром 12 дюймов для установки на раздаточный миксер литейного конвейера. Фильтр предназначен для очистки от твердых включений и дополнительной компенсации тепловых потерь в расплаве.

6. Разработаны ряд оригинальных технических решений. В основе конструкции фильтра заложены карбидокремниевые трубчатые нагреватели в крышке для прогрева камеры фильтрации и подогрева алюминия во время

литься, а так же конвективный нагреватель для предварительного прогрева ПКФ. Для защиты нагревательных элементов установлена керамическая защитная пластина. Для исключения термического поражения обслуживающего персонала, разработана рычажная система параллельного открывания крышки с применением пневматического привода и горизонтального положения крышки при подъеме.

7. Для выполнения оперативного контроля и управления была разработана система АСУ ТП на основе логического контроллера Siemens Simantic S 1 200. Функциональные возможности АСУ ТП позволяют выполнять контроль состояния нагревательных элементов, тиристорных регуляторов и системы управления. Автоматическое формирование рабочего архива с текущими контрольными параметрами и информацией об ошибках позволяют оперативно находить источник неисправностей.

8. В результате выполнения диссертационной работы были достигнуты поставленные цели, в частности разработан компактный фильтр-бокс с пенокерамическим фильтром с комбинированным нагревом, который используется в составе плавно-литйеного агрегата для механической отчистки расплава алюминия от включений с целью повышения качества сплава, эффективного как в режиме предварительного нагрева, так и в режиме литья.

9. К практической ценности диссертационной работы можно отнести повышение безопасности обслуживающего персонала и улучшения условий труда за счет использования горизонтального расположения раскаленной поверхности крышки при ее подъеме, а так же переход с традиционной байпасной схема фильтрации на более компактную проходную, что существенно сокращает габариты установки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андрушевич, А.А. Применение пенокерамических фильтров при получении отливок из вторичных алюминиевых сплавов / А.А. Андрушевич, А.Н. Леонов, О.Л. Сморгы и др. // Литейное производство, 1998. № 5. - С. 18-20.
2. Альтман, М.Б. Неметаллические включения в алюминиевых сплавах. / Metallurgia, 1965. 128 с.
3. Спасский, А.Г. очистка металлов от неметаллических включений. / А.Г. Спасский, Н.С. Клячина. // Литейное производство, 1959. № 4. — С.30.31.
4. Смирнова К. А. Пористая керамика для фильтрации и аэрации. Госстройиздат, 1968, 171 с.
5. Степанова Т.Н. Гильманшина Т.Р., Падалка В.А. Основы получения отливок из сплавов цветных металлов/ Красноярск, 2012
6. <http://www.stavrol.ru/articles/70/>
7. <http://bellit.ru>
8. http://pmet.ru/catalog/rubric3/penokeramicheskie_filtry/
9. <http://aluminium-guide.ru/vklyucheniya-v-alyuminievyyh-slitkax-stolbax-dlya-pressovaniya/>
10. <http://www.ruscastings.ru/files/file186.pdf>
11. <http://gl-tech.ru/products/filtr-tonkoy-ochistki-pdbf>
12. Аубрей С., Олсон Р., Кучменко А., Смит Д.Д. Бесфосфатные пенокерамические фильтры для очистки алюминиевого расплава в заготовительном литье // SELEE Corporation, США
13. Гузман И. Я. Высокоогнеупорная пористая керамика. М:Металлургия, 1971, 208 с.
14. Беркман А. С. Пористая проницаемая керамика. П.: Госстройиздат, 1959. 170 с.

15. Веричев Е. Н., Черепанов Б. С., Опалейчук Л. С., Краснопольская М. Д. Фильтрующая пенокерамика для расплавов цветных металлов. Тр. Гос. НИИСтройкерамика. с. 85-91.
16. Ловцов Д.П. Влияние неметаллических включений на образование газовой пористости // Литейное производство. – 1955.- №12.- С.18-20.
17. П.В. Трусов [и др.] Введение в математическое моделирование: учеб.пособие /. – М.: Логос, 2004. – 440 с. 2.
18. Цаплин А.И. Теплофизика в металлургии: учеб.пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 230 с.
19. Суюндиков М.М. Фильтрование металла в литейной форме // Сб. материалов по фильтрам, эффективности применения, опыту использования в отечественной и зарубежной практике. Москва, 2005 г. 11.
20. Анализ процесса блокирования фильтров неметаллическими включениями // Сб. трудов междунар. науч.-техн. конф. «IV чтения Ш. Шокина», 2 том. Павлодар: ПГУ им. С. Торайгырова, 2010. С. 173–177.
21. Напалков В.И. Непрерывное литье алюминиевых сплавов: справочник. М.: ИнтерметИнжиниринг, 2005.- 512с.
22. Макаров Г.С. Слитки из алюминиевых сплавов с магнием и кремнием для прессования. Основы производства. М.: ИнтерметИнжиниринг, 2011.- 528с.
23. Основы теплопередачи/ Сост. Михеев М.А., Михеева И.М.; учеб. Изд. – 2-е., стереотип-М.: «Энергия»,1977, 15-18 с.
24. Коротков В.Г. Рафинирование литейных алюминиевых сплавов. – М.:Свердловск, Машгиз, 1963.- 127 с.
25. Конструкции и принцип работы оборудования для изготовления слитков из алюминия и его сплавов. Атлас конструкций [Электронный ресурс] : учеб.пособие / Т. Р. Гильманшина, Л. И. Мамина, Н. Н. Довженко [и др.]. - Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. - 238 с. - ISBN 978-5-7638-2648-7.

26. Современное оборудование и материалы для фильтрации алюминия и его сплавов / Ф. Ройш, Й. Шнелле // Цветные металлы. - 2008. - № 1. - С. 86-87. - ISSN 0372-2929
27. Полежаев В.И., Бунэ А.В., Вerezуб Н.А. и др. Математическое моделирование конвективного теплообмена на основе уравнений Навье - Стокса. М.: Наука, 1987
28. Остроумов Г.А. Свободная тепловая конвекция в условиях внутренней задачи. М.: Гостехиздат, 1952.
29. Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972.
30. Зенкевич. О. Метод конечных элементов в технике. Перевод Б.Е. Победри. М.: «Мир», – 1975. 543 с.
31. Темам Р., Уравнения Навье-Стокса теория и численный анализ. пер. М.: «Мир», – 1981. 408 с.
32. Беляев, А.И. Металлургия легких металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 368 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Схема электрическая общая

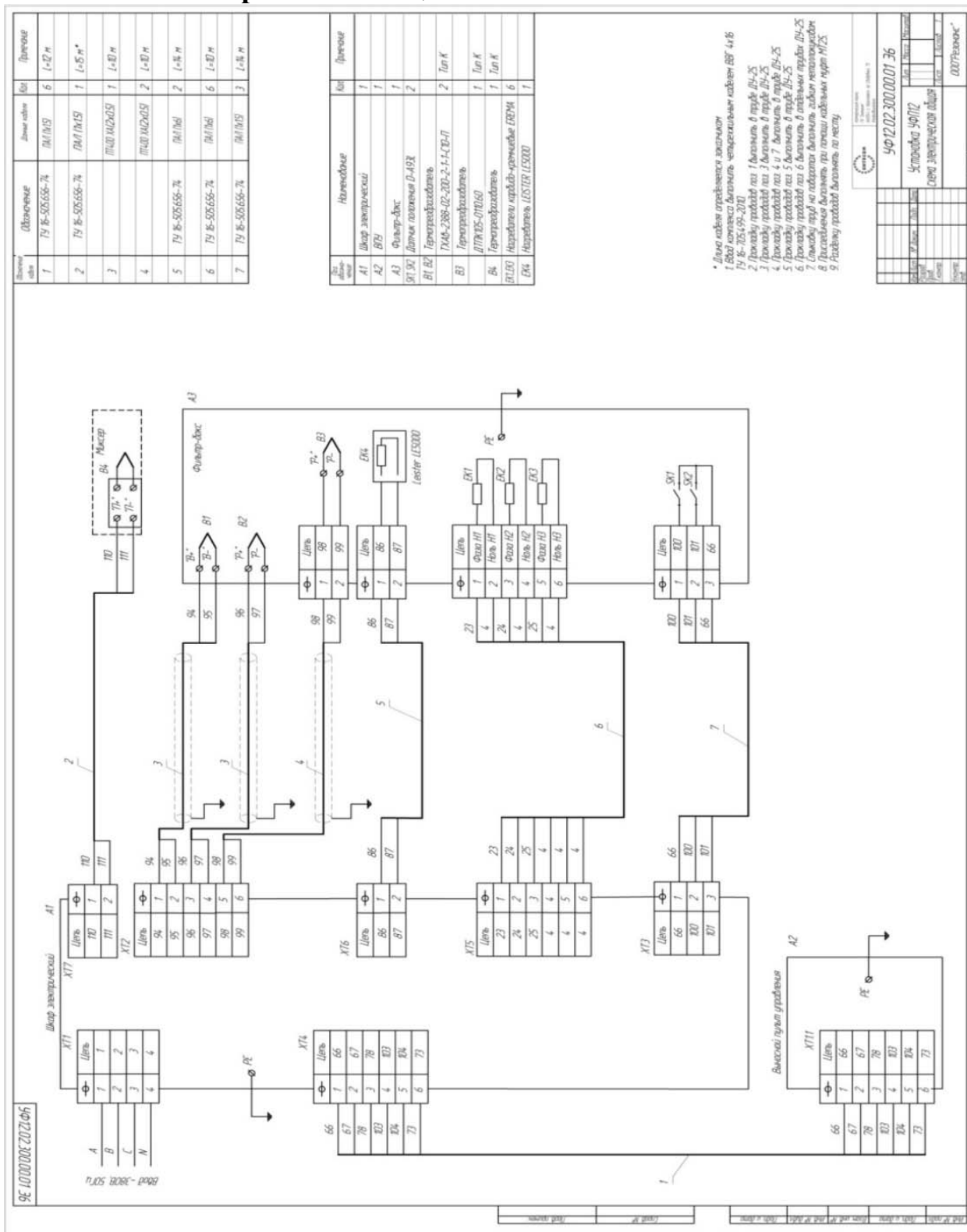


Рисунок А.1 – схема электрическая общая УФП12

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Чертеж общего вида

Согласовано:

УФ.000.000.000.00 В0

Установка фильтрации
Чертеж общего вида

Изм/Лист	№ докум.	Лист	Дата
Разраб.	Выполн.		
Проф.			
Т.контр.		Лист	Листов
И.контр.		000	"Резонанс"
Упл.		2	Красноярск

Копировать формат А3

1 Размеры для справок.
2 Расположение электрощкафа показано условно.

Рисунок Б.1 – Чертеж общего вида УФЗ12