



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
MEHAANIKATEADUSKOND

Soojustehnika instituut

MST õppetool

MST40LT

*Roman Farber*

**PULBERVÄRVIMISE AHI**  
Bakalaureusetöö

Autor taotleb  
tehnikateaduste bakalaureuse  
akadeemilist kraadi

Tallinn  
2014

## AUTORIDEKLARATSIOON

Deklareerin, et käesolev lõputöö on minu iseseisva töö tulemus.

Esitatud materjalide põhjal ei ole varem akadeemilist kraadi taotletud.

Töös kasutatud kõik teiste autorite materjalid on varustatud vastavate viidetega.

Töö valmis..... juhendamisel

“.....”.....201...a.

Töö autor

..... allkiri

Töö vastab bakalaureusetööle esitatavatele nõuetele.

“.....”.....201...a.

Juhendaja

..... allkiri

Lubatud kaitsmisele.

..... õppekava kaitsmiskomisjoni esimees

“.....”.....201... a.

..... allkiri

## **BAKALAUREUSETÖÖÜLESANNE**

2014 aasta kevadsemester

Üliõpilane: Roman Farber, 140231MASB

Õppekava: Soojusenergeetika (MASB02)

Eriala .....

Juhendaja: dotsent Andrei Dedov

Konsultandid: ..... (nimi, amet, telefon)

.....

### **BAKALAUREUSETÖÖ TEEMA:**

Pulbervärvimise ahi

Powder coating oven

### **Lõputöös lahendatavad ülesanded ja nende täitmise ajakava:**

Nr	Ülesande kirjeldus	Täitmise tähtaeg
1.	Lõputöö ülesannete püstitamine	01.04.2014
2.	Teoreetilise materjali otsimine ja läbitöötamine	01.05.2014
3.	Ahjukambri soojusarvutus	12.05.2014
4.	Ahjukambri aerodünaamiline arvutus	12.05.2014
5.	Tulemuste analüüs ja süstematiseerimine	26.05.2014
6.	Lõputöö vormistamine	02.06.2014

**Lahendatavad insenertehnilised ja majanduslikud probleemid:** Reaalse ahjukambri soojusarvutus ja aerodünaamiline arvutus. Ahju elektriliste kütekehade võimsuse valik. Ahju ventilaatori valik.

**Täiendavad märkused ja nõuded:**.....

**Töö keel:** vene keel.

Kaitsmistaotlus esitada hiljemalt 19.05.2014

**Töö esitamise tähtaeg**.....

Üliõpilane Roman Farber

/allkiri/ .....

kuupäev.....

Juhendaja dotsent Andrei Dedov

/allkiri/ .....

kuupäev.....

Konfidentsiaalsusnõuded ja muud ettevõttepoolsed tingimused formuleeritakse pöörde

## СОДЕРЖАНИЕ

Задача бакалаврской работы .....	3
Eessõna .....	6
Предисловие .....	6
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	7
<b>1. ПОРОШКОВАЯ ПОКРАСКА</b> .....	8
1.1. Преимущество порошковой покраски .....	8
1.2. Технология и производство .....	8
<b>2. КАМЕРА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ (ПЕЧЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ)</b> .....	11
2.1. Конструкция корпуса камеры полимеризации .....	11
2.2. Материалы используемые в конструкции камеры полимеризации.....	11
<b>3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС</b> .....	15
3.1. Статьи расходной части теплового баланса .....	15
3.1.1. Тепло, необходимое для нагрева изделий .....	15
3.1.2. Тепло, необходимое для полимеризации.....	16
3.1.3. Потери тепла через ограждения .....	16
3.1.4. Тепло, необходимое для нагрева камеры.....	22
3.1.5. Тепловые потери при загрузке и выгрузке изделий через открытые двери камеры .....	23
3.1.6. Тепло, необходимое для нагрева вспомогательного оборудования .....	26
3.2. Уравнение энергетического баланса .....	27
<b>4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ</b> .....	29
4.1. Теоретические основы расчета потерь давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений .....	29
4.2. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале нагрева воздуха .....	30
4.3. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале оттока воздуха „K1“ .....	32
4.4. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале наружного воздушного тракта .....	34
4.5. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале притока воздуха „K2“ .....	39

4.6. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в пустой зоне камеры до и после заготовок -----	42
4.7. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в рабочей зоне камеры -----	44
4.8. Суммарные потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений при циркуляции в камере -----	46
<b>5. ОБОРУДОВАНИЕ КАМЕРЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ -----</b>	<b>47</b>
5.1. Трубчатый электронагреватель -----	47
5.2. Выбор центробежного вентилятора -----	49
5.3. Пульт управления камерой полимеризации -----	51
5.4. Частотный преобразователь -----	51
5.4.1. Выбор частотных преобразователя -----	52
5.5. Системы автоматики -----	55
5.5.1. Контроль температуры воздуха в камере полимеризации -----	55
5.5.2. Регулирование температуры воздуха в камере полимеризации -----	56
5.5.3. Система вентиляции воздуха в зоне нанесения порошковой краски и в зоне остывания изделия -----	59
5.5.4. Микропроцессорное реле -----	60
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ -----</b>	<b>62</b>
<b>КОККУVÖТТЕ -----</b>	<b>63</b>
<b>SUMMARY -----</b>	<b>64</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНТЕРНЕТ СТРАНИЦ -----</b>	<b>65</b>

## **EESSÕNA**

Lõputöö teema valiku määras tehases Falconet Metall tekkinud vajadus uuendada värvimistehhi sisseseadet, nimelt vahetada välja pulbervärvi polimerisatsiooniahi. Tänapäeval ma töotan OÜ Falconet Metall tehases konstruktorina. Töös vajalikud arvutused tehti Tallinna Tehnikaülikooli Soojustehnika instituudis dotsent A. Dedovi juhendamisel. Täna A. Dedovit ja T.Lausmaa abi eest diplomitöö kirjutamisel ja teadusliku kirjanduse muretsemisel.

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Тема дипломной работы была выбрана в связи с тем, что на заводе Falconet Metall возникла необходимость обновить оборудование покрасочного цеха, а конкретно заменить печь полимеризации порошковой краски. В данный момент я являюсь работником фирмы Falconet Metall в должности конструктора. Работа по расчетам проводилась в Таллинском Техническом Университете под руководством доцента А. Дедова.

Благодарю А. Дедова и Т. Лаусмаа за помощь в написании дипломной работы и предоставлении научной литературы.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Темой дипломной работы была выбрана «Печь полимеризации порошковой краски ». Порошковая покраска становится сегодня основным методом окраски в промышленных масштабах. Технология порошковой покраски была разработана в 1950 году в Германии. В 60-х годах, был разработан электростатический способ нанесения краски. Нанесённая порошковая краска образует полимерное покрытие, препятствующее коррозии окрашиваемого металла. Окрашиваемым материалом может быть не только металл. Краска может наноситься на стеклянные поверхности, керамические.

В настоящее время порошковая краска постепенно вытесняет с рынка жидкую краску. Порошковая покраска превосходит по технологическим параметрам жидкие. Экономические и эстетические показатели порошковых красок, так же превосходят своего основного на сегодняшний день конкурента.

Целью работы является проектирование новой печи полимеризации порошковой краски для производственного здания завода Falkonet Metall.

Приняты условия:

- покраска изделий порошковой полимерной краской;
- покрасочный цех может окрасить изделия в виде шкафов из листовой стали толщиной 0,7 мм площадью до 1770 м<sup>2</sup> в смену (10 часов), в зависимости от размеров и формы детали;
- производительность печи позволяет вести круглосуточный режим работы покрасочного цеха.

В работе приведены основы проектирования электрических промышленных печей.

Выбранная тема охватывает спектры теплотехники такие как:

- основы теплотехники;
- тепло-массо обмен (расчет теплового баланса печи);
- термодинамику (расчет теплового баланса печи);
- материаловедение (выбор материалов корпуса печи);
- проектирования тепловых агрегатов (проектирование корпуса печи);
- гидро-газомеханику (аэродинамический расчет печи);
- основы измерений (выбор измерительного оборудования);
- основы тепло-автоматики (выбор автоматического оборудования).

# **1. ПОРОШКОВАЯ ПОКРАСКА**

## **1.1. Преимущество порошковой покраски**

Покраска порошковой краской является большим преимуществом перед обычными в том, что они могут имитировать поверхность различных металлов, в том числе и драгоценных, таких как золото, серебро. С помощью порошковой краски можно имитировать поверхность меди, стали, или бронзы.

Известные многим окисляемые свойства металлов – таких как бронза, например, могут быть устранены. В этом помогает покраска порошковой краской, образуемый ей слой полимерного покрытия.

Преимуществом перед жидкими красками состоит ещё в том, что созданная полимерная поверхность очень прочна, и выдерживает удары. Область температурного применения порошковых красок после полного завершения технологического процесса нанесения намного шире традиционных красок - начинается от -60 и заканчивается +150 градусами по Цельсию. Стоит заметить, что эксплуатационный срок порошковой краски после нанесения её на поверхность изделия, при соблюдении технологических требований, превышает от 10 до 15 раз эксплуатационный срок масляных красок. Отличительной чертой в положительную сторону порошковых красок, является экологическая безопасность и цены. Порошковая покраска за счёт отсутствия в её составе растворителей дешевле и экологически безопасней. Это исключает вредный фактор, присутствующий на производстве, использующем жидкие краски на основе растворителей.

## **1.2. Технология и производство**

Технологический процесс окрашивания порошковыми красками стандартно включает следующие стадии:

- подготовка поверхности;
- нанесение порошковой краски;
- формирование покрытия (отверждение/полимеризация).

### Подготовка поверхности.

Технология подготовки поверхности перед окрашиванием практически не отличается от технологии, применяемой при традиционных методах нанесения лакокрасочных

материалов — здесь также применяется обезжиривание, травление, фосфатирование поверхности. Для не корродированной поверхности бывает достаточно обезжиривания путем протирки материалом, смоченным органическим растворителем или отжигом.

#### Нанесение порошковой краски.

Большинство порошковых покрытий получают способом электростатического распыления. Электростатическое нанесение порошковых красок основывается на сообщении частицам порошка электрического заряда.

Суть данного метода состоит в следующем: частицы порошковой краски, проходя через распылитель, получают электростатический (отрицательный) или трибостатический (положительный) заряд и наносятся на поверхность изделия равномерным слоем, так как изделие заземлено и имеет электрический заряд той же полярности.

Порошок при электростатическом нанесении распределяется равномерно по плоским поверхностям изделия и несколько более толстым слоем на острых углах и краях изделия, что улучшает качество покрытия.

Технология нанесения краски позволяет снизить цены. Порошковая покраска, технология её нанесения исключает перерасход материала.

#### Формирование покрытия.

Процесс формирования покрытия происходит в печи отверждения (в камере полимеризации) независимо от используемого метода нанесения порошковой краски.

После нанесения порошковой краски окрашенное изделие помещают в печь и выдерживают при температуре 180-190°C в течение 15 мин [1]. При нагревании краска плавится и равномерно растекается по поверхности изделия, образуя тонкую и прочную пленку толщиной 60-80 мкм [1].

Выбранный метод отверждения порошковых красок — путем нагревания изделий конвенционным способом, предусматривающим полный прогрев всего изделия до нужной температуры.

Низкотемпературный способ отверждения (при 120-130°C) применяется для окраски изделий, чувствительных к высоким температурам. Но данный метод отверждения применим только к эпоксидным порошковым краскам. Данный метод не подходит, так как металлическая мебель достаточно стойкая к высоким температурам и эпоксидные краски дороже чем порошковые краски на основе полиэлифинов.

Метод ИК-отверждения порошковой краски позволяет за короткое время полностью нагреть изделие до нужной температуры, что значительно уменьшает габариты оборудования и сокращает технологический процесс. Но данный метод подходит

только для изделий простой конфигурации, не отбрасывающих на себя тени, а также предусматривает подбор специальной рецептуры краски, то не подходит для изготовления таких изделий как металлическая мебель.

Процесс полимеризации порошковой краски происходит следующим образом:

- на пульте управления включается вводной автомат и кнопка ПУСК, при этом включается термоблок, и начинается нагрев камеры;
- через дверной проем в камеру полимеризации по транспортной системе загружается загрузочная тележка с изделиями с нанесенной на них порошковой краской. Двери камеры закрываются и запираются специальным механизмом;
- терморегулятор пульта управления камеры полимеризации настраивается на температуру до 190°C.

Габариты печи полимеризации принимались основываясь на местных условиях, а точнее на свободной площади покрасочного цеха и максимальных габаритов изделий в виде металлической мебели производимой на заводе. Производительность покрасочного цеха рассчитывается при условиях, что одна бригада в смену (10 часов) может окрасить изделия из листового металла толщиной 0,7 мм площадью до 1770 м<sup>2</sup>, в зависимости от размеров и формы детали.

## **2. КАМЕРА ПОЛИМЕРИЗАЦИИ (ПЕЧЬ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ)**

### **2.1. Конструкция корпуса камеры полимеризации**

Камера полимеризации (печь полимеризации, печь оплавления) предназначена для осуществления технологического процесса полимеризации порошковых композиций, нанесенных на изделия, и представляет собой сборную конструкцию из сэндвич панелей, наружные слои из оцинкованной стали DC01 толщиной 1мм, а внутренняя полость заполнена теплоизоляционным материалом PAROC Fire Slab 100 толщиной 25 мм и ROCKWOOL Super Rock толщиной 200 мм. Конструкция камеры полимеризации обеспечивает сохранение достигнутой температуры внутри камеры в течение длительного времени. Наружные размеры камеры выбраны по размерам покрасочного цеха завода: высота 3100 мм, ширина 3040 мм, длина 3700 мм.

Проем для загрузки изделий закрывается теплоизолированными дверями с установленным на них, по периметру, высокотемпературным огнеупорным шнуром из керамического волокна и снабженными запорным механизмом. Нагрев камеры полимеризации осуществляется отдельными термоблоками. Конструкция камеры позволяет расположить отдельные термоблоки на боковых стенках внутреннего объема и закрыть их теплоотражающими экранами, тем самым образуя канал нагрева воздуха. Длина и высота канала нагрева воздуха позволяет расположить два ряда термоблоков. В камере всего восемь, отдельно установленных термоблоков.

Внутри термоблока монтируются 6 шт. ТЭН, с шагом 230 мм. Расположение ТЭН в шахматном порядке на первом и втором ряду термоблоков даст более равномерный нагрев потока воздуха в канале. Конструкция термоблока позволяет быстро производить профилактику нагревательных элементов и замену вышедших из строя ТЭНов.

Вентилятор, подключенный к камере полимеризации, осуществляет принудительную циркуляцию воздуха с целью создания равномерной температуры внутри камеры.

### **2.2. Материалы используемые в конструкции камеры полимеризации.**

PAROC Fire Slab 100 - жесткая плита на основе базальтовой ваты, не горючая, применяется для теплоизоляции воздуховодов, котлов, технологического

оборудования, а так же для огнезащиты воздуховодов. Номинальная плотность 100 кг/м<sup>3</sup>. Теплоизоляционные материалы PAROC применимы в широком диапазоне температур. Связующее начинает испаряться при температуре выше 200°C. Изоляционные характеристики остаются неизменными, но прочность на сжатие ослабевает. Материалы на основе базальтового волокна имеют температуру спекания выше 1000°C. Данные характеристики задекларированы на веб-сайте завода производителя [2].

Пожаро-технические характеристики PAROC Fire Slab 100: Группа горючести A1 в соответствии с EN 13501-1; пожарная классификация KM0 (группа НГ) в соответствии с TP 123.

Данные заявлены на основании Технического Свидетельства № ТС-07-0876-04, полученного на основании Технической оценки № ТО-0876-04, и действительного до 23.01.2007 г.) SFS 5356.

Влагостойкость: водопоглощение при полном погружении за 24 часа, не более  $\leq 1$  кг/м<sup>2</sup> в соответствии с EN 1609.

Стабильность размеров при максимальной рабочей температуре - 550°C / EN 14303:2009 (EN 14707).

PAROC Hvac Section AluCoat T - цилиндры из базальтовой ваты на негорючей основе, применяются для теплоизоляции и защиты от конденсата трубопроводов в помещениях и на судах. Цилиндры покрыты усиленной алюминиевой фольгой и имеют продольный самоклеющийся клапан. Type-Examination (Module B) certificate No. VTT-C-6624-15-11 issued by VTT.

Температура поверхности покрытия не должна превышать 80°C (ограничение температур определяется в соответствии с термостойкостью клеящего состава).

Теплоизоляционные материалы PAROC применимы в широком диапазоне температур. Связующее начинает испаряться при температуре выше 200°C. Изоляционные характеристики остаются неизменными, но прочность на сжатие ослабевает. Материалы на основе базальтового волокна имеют температуру спекания выше 1000°C. Данные характеристики задекларированы на веб-сайте завода производителя [2].

Пожаро-технические характеристики PAROC Hvac Section AluCoat T: группа горючести A2L - s1, d0 в соответствии с EN 13501-1; пожарная классификация KM1 (Г1, В1, Д1, Т1) основа НГ в соответствии с TP 123; противопожарная изоляция воздуховодов в соответствии с SFS 4193:E; класс пожарной безопасности – негорючий в соответствии с IMO FTPC Code Part 1; класс воспламеняемости покрытия - Low

flame-spread characteristics в соответствии с IMO FTPC Code Part 5; класс пожарной опасности - Материал на негорючей основе в соответствии с EN ISO 1182.

Данные заявлены на основании Технического Свидетельства № ТС-07-0875-04, полученного на основании Технической оценки № ТО-0875-04, и действительного до 23.01.2007 г.) SFS 5355.

Влагостойкость: водопоглощение при полном погружении за 24 часа, не более  $\leq 1$  кг/м<sup>2</sup> в соответствии с EN 13472.

Наружный воздушный тракт печи полимеризации выполнен из оцинкованной стальной трубы DC01 толщиной S=1мм и диаметром d=400 мм, наружная сторона трубы покрыта PAROC Hvac Section AluCoat T толщиной 50 мм.

ROCKWOOL Super Rock – плиты изготавливаются из каменной ваты на основе горных пород базальтовой группы. Плиты из каменной ваты Super Rock предназначены для тепловой изоляции воздухопроводов, газоходов, резервуаров, бойлеров, технологического оборудования, плоских вертикальных и горизонтальных поверхностей, печей, на объектах различных отраслей промышленности (кроме пищевой) и оборудования инженерных систем в жилищном, гражданском и промышленном строительстве. Температура применения от -180 до +450°C. Номинальная плотность 40 кг/м<sup>3</sup>. Данные характеристики задекларированы на веб-сайте завода производителя [3].

Пожаро-технические характеристики ROCKWOOL Super Rock: Группа горючести А1 в соответствии с EN 13501-1; пожарная классификация КМ0 (группа НГ) в соответствии с ТР 123.

Влагостойкость: водопоглощение при полном погружении за 24 часа, не более  $\leq 1$  кг/м<sup>2</sup> в соответствии с EN 1609.

Таблица 2.2.1. Теплотехнические характеристики материалов [2,3,4].

№ п.	Наименование	Температура, °С	Теплопроводность ROCKWOOL Super Rock, λ <sub>р</sub> , Вт/м·°С	Теплопроводность PAROC Fire Slab 100, λ <sub>р</sub> , Вт/м·°С	Теплопроводность PAROC Hvac Section AluCoat T, λ <sub>рн</sub> , Вт/м·°С	Теплопроводность стали DC01, λ <sub>м</sub> , Вт/м·°С
1	Теплопроводность в сухом состоянии	10	0,036	0,034	0,034	63,4

2	Теплопроводность в сухом состоянии	25	0,038	0,037	0,037	62,8
3	Теплопроводность в сухом состоянии	30	0,039	0,037	0,0379	62,8
4	Теплопроводность	50	0,042	0,038	0,037	62,9
5	Теплопроводность	97	0,049	0,045	0,042	60,6
6	Теплопроводность	100	0,049	0,045	0,042	60
7	Теплопроводность	105	0,05	0,046	0,043	60
8	Теплопроводность	125	0,054	0,045	0,047	59
9	Теплопроводность	150	0,058	0,053	0,049	58
10	Теплопроводность	172	0,062	0,058	0,054	57
11	Теплопроводность	180	0,062	0,059	0,055	56,6
12	Теплопроводность	190	0,064	0,061	0,057	56,4
13	Теплопроводность	200	0,065	0,063	0,059	56
14	Теплопроводность	300	0,080	0,088		51
15	Теплопроводность	400		0,119		47
16	Теплопроводность	500		0,198		41

Таблица 2.2.2. Теплотехнические характеристики стали DC01 [4].

№ п.	Наименование	Обозначение	Температура, °С	Удельная теплоемкость, Дж/кг·°С
1	Удельная теплоемкость	C 20	20	482
2	Удельная теплоемкость	C 100	100	498
3	Удельная теплоемкость	C 190	190	512,4
4	Удельная теплоемкость	C200	200	514
5	Удельная теплоемкость	C 300	300	533
6	Удельная теплоемкость	C 400	400	555
7	Удельная теплоемкость	C 500	500	584

### 3. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

Цель составления теплового баланса для проектируемой печи - определение расхода тепла для выбора тепловой мощности ТЭНов. Тепловой баланс печи состоит из равных между собой приходной и расходной частей, каждая из которых складывается из ряда статей. Для печей периодического действия тепловой баланс составляют на один цикл работы.

#### 3.1. Статьи расходной части теплового баланса

##### 3.1.1. Тепло, необходимое для нагрева изделий

Камера рассчитана для полимеризации одновременно четырёх изделий максимальных габаритов производимых на предприятии. Изделия выполняются из листовой стали DC01 толщиной 0,7 мм, вес одного изделия максимальных габаритов 1900x550x1200 мм составляет 63 кг.

Согласно нормам и правилам на постоянных рабочих местах в помещениях цехов предприятий в холодный и переходный периоды года (при температуре наружного воздуха ниже 10°C) оптимальная температура воздуха должна быть 17...19°C, допустимая 15...20°C; оптимальная относительная влажность воздуха 60...30% и допустимая — не более 75%, скорость движения воздуха не менее 0,3 м/с и не более 0,5 м/с. Принимаем, что температура изделия в зоне нанесения порошковой краски 20°C, а полимеризация краски происходит при 180-190°C, можно посчитать количество теплоты, получаемое телом.

$$\begin{aligned} Q_T &= 4 \cdot m \cdot C_{TK} \cdot (t_2 - t_1) = 4 \cdot m \cdot \left( \frac{C_{20} + C_{190}}{2} \right) \cdot (t_2 - t_1) = \\ &= 4 \cdot 63 \cdot \left( \frac{482 + 512,4}{2} \right) \cdot (190 - 20) = 21,3 \text{ МДж} \end{aligned} \quad (1)$$

где  $Q_T$  – количество теплоты получаемое телом;

$C_{TK}$  – средняя удельная теплоемкость стали DC01 при температуре от 20°C до 190°C (см. табл. 2.2.2);

$t_1$  – температура изделия в зоне нанесения порошковой краски (см. стр. 15);

$t_2$  – максимальная температура камеры при полимеризации краски (см. стр. 9).

### 3.1.2. Тепло, необходимое для полимеризации

Производитель порошковой краски утверждает, что количество теплоты получаемое краской при процессе полимеризации настолько мало, что им можно пренебречь.

### 3.1.3. Потери тепла через ограждения

Потери тепла через ограждения рассчитывались в соответствии с методикой, представленной в [5].

Наружная площадь камеры учитывав все 6 ограждений:

$$\begin{aligned} F_{M1} = F_{PS} &= 2 \cdot (h_s \cdot k_s + h_s \cdot l_s + l_s \cdot k_s) = \\ &= 2 \cdot (2,65 \cdot 3,25 + 2,65 \cdot 2,59 + 2,59 \cdot 3,25) = 47,787 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} F_{PV} = F_{RS} &= 2 \cdot (h_{PV} \cdot k_{PV} + h_{PV} \cdot l_{PV} + l_{PV} \cdot k_{PV}) = \\ &= 2 \cdot (2,7 \cdot 3,3 + 2,7 \cdot 2,64 + 2,64 \cdot 3,3) = 49,5 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} F_{M2} = F_{RV} &= 2 \cdot (h_v \cdot k_v + h_v \cdot l_v + l_v \cdot k_v) = \\ &= 2 \cdot (3,1 \cdot 3,7 + 3,1 \cdot 3,04 + 3,04 \cdot 3,7) = 64,284 \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$F_{PK} = \frac{F_{PS} + F_{PV}}{2} = \frac{47,787 + 49,5}{2} = 48,644 \text{ м}^2 \quad (5)$$

$$F_{RK} = \frac{F_{RS} + F_{RV}}{2} = \frac{49,5 + 64,284}{2} = 56,892 \text{ м}^2 \quad (6)$$

где  $F_{M1}$  – площадь внутреннего слоя оцинкованной стали;

$h_s$  – высота внутреннего слоя оцинкованной стали;

$k_s$  – длина внутреннего слоя оцинкованной стали;

$l_s$  – ширина внутреннего слоя оцинкованной стали;

$F_{M2}$  – площадь наружного слоя оцинкованной стали;

$h_v$  – высота наружного слоя оцинкованной стали;

$k_v$  – длина наружного слоя оцинкованной стали;

$l_v$  – ширина наружного слоя оцинкованной стали;

$F_{PS}$  – площадь внутренней стороны слоя PAROC Fire Slab 100;

$F_{PV}$  – площадь наружной стороны слоя PAROC Fire Slab 100;

$h_{PV}$  – высота наружного слоя PAROC Fire Slab 100;

$k_{PV}$  – длина наружного слоя PAROC Fire Slab 100;  
 $l_{PV}$  – ширина наружного слоя PAROC Fire Slab 100;  
 $F_{PK}$  – средняя площадь слоя PAROC Fire Slab 100;  
 $F_{RS}$  – площадь внутренней стороны слоя ROCKWOOL Super Rock;  
 $F_{RV}$  – площадь наружной стороны слоя ROCKWOOL Super Rock;  
 $F_{RK}$  – средняя площадь слоя ROCKWOOL Super Rock.

Электрическая печь представляет собой камеру с формой параллелипипеда и имеет 6 ограждений, каждое из которых состоит из четырех слоев (см. рис. 1). Первый слой представляет собой лист оцинкованной стали DC01 толщиной 1мм; второй – слой тепловой изоляции PAROC Fire Slab 100 толщиной 25 мм; третий – слой ROCKWOOL Super Rock толщиной 200 мм; четвертый – оцинкованная сталь DC01 толщиной 1 мм.

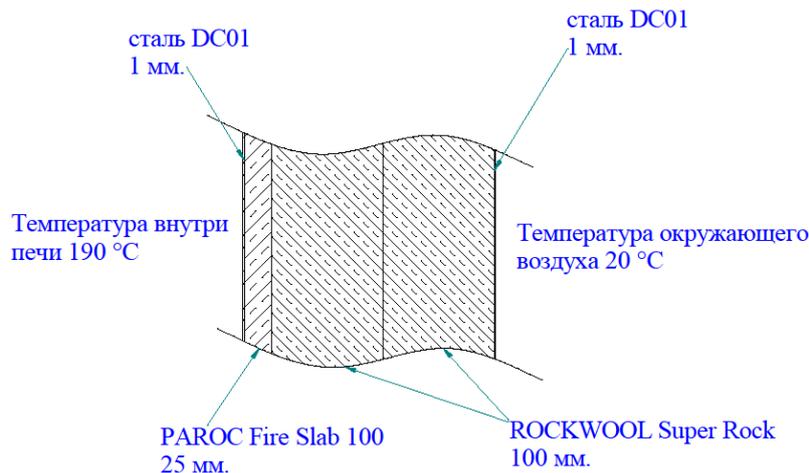


Рис. 1. Схема многослойной стенки камеры.

Тепловые потери корпуса (граничные условия третьего рода).

Потери тепла через ограждения рассчитывались в соответствии с методикой, представленной в [5].

Задаемся граничными температурами.

Согласно технологии процесса, температура внутри печи должна быть 190°C (см. стр. 9), температура окружающего воздуха 20°C (см. стр. 15).

Согласно методике [5] необходимо задаться температурами внутренней и наружной поверхности печи. Принимаем: Температура внутренней поверхности  $t_s=180^\circ\text{C}$ , наружной  $t_v=30^\circ\text{C}$ .

Так как коэффициент теплопроводности материала ROCKWOOL Super Rock примерно равен теплопроводности материала PAROC Fire Slab 100 (см. табл. 2.2.1), а толщина слоя ROCKWOOL Super Rock в 8 раз больше слоя PAROC Fire Slab 100, то, учитывая, что температурные перепады в отдельных слоях ограждений будут пропорциональны тепловым сопротивлениям этих слоев, температурный перепады в этих слоях будут отличаться в 8 раз. Принимаем условно перепад температуры в слое PAROC Fire Slab 100 (толщиной  $S_p=25$  мм) равным 1 условной единице, а в слое ROCKWOOL Super Rock (толщиной  $S_R=200$  мм) равным 8 условным единицам. Так как теплопроводность стали DC01 в 1860 раз больше теплопроводности других используемых материалов, (см. табл. 2.2.1), то температурный перепад в стали DC01 (толщиной  $S_{M1}=S_{M2}=1$  мм) настолько мал, что им можно пренебречь.

Суммарный перепад в стене в условных единицах  $8+1=9$ , в градусах  $180-30=150^\circ\text{C}$ .

Таким образом, можно принять, что температурные перепады в слоях:

$$\text{PAROC Fire Slab 100} \quad \Delta t_p = 150/9=16,7^\circ\text{C}, \quad (7)$$

$$\text{ROCKWOOL Super Rock} \quad \Delta t_R = 150-16,7=133,3^\circ\text{C}. \quad (8)$$

$$\text{В соответствии с этим температура на границе PAROC Fire Slab 100 - ROCKWOOL Super Rock} \quad 180-16,7=163,3^\circ\text{C}. \quad (9)$$

Средняя температура в слоях:

$$\text{в слое PAROC Fire Slab 100} \quad (180+163,3)/2=171,65^\circ\text{C}, \quad (10)$$

$$\text{в слое ROCKWOOL Super Rock} \quad (163,3+30)/2=96,65^\circ\text{C}. \quad (11)$$

Нагрев камеры происходит путем потока воздуха внутри камеры нагреваемого при помощи ТЭНов. Рекомендуемая, фирмой производителем оборудования для линий полимерной порошковой окраски, скорость в канале нагрева воздуха  $v=4$  м/с [6].

$$\text{Площадь канала нагрева воздуха равна: } S_{KAN}=3280 \cdot 150/10^6=0,492 \text{ м}^2. \quad (12)$$

Расход воздуха в поперечном сечении канала:

$$Q = S_{KAN} \cdot v = 0,492 \cdot 4 = 1,968 \text{ м}^3 / \text{с}, \quad (13)$$

где  $Q$  – расход воздуха внутри камеры;

$v$  – средняя скорость в поперечном сечении потока, т. е. условная, одинаковая для всех точек сечения скорость, при которой расход потока будет такой же, как и при различных местных скоростях.

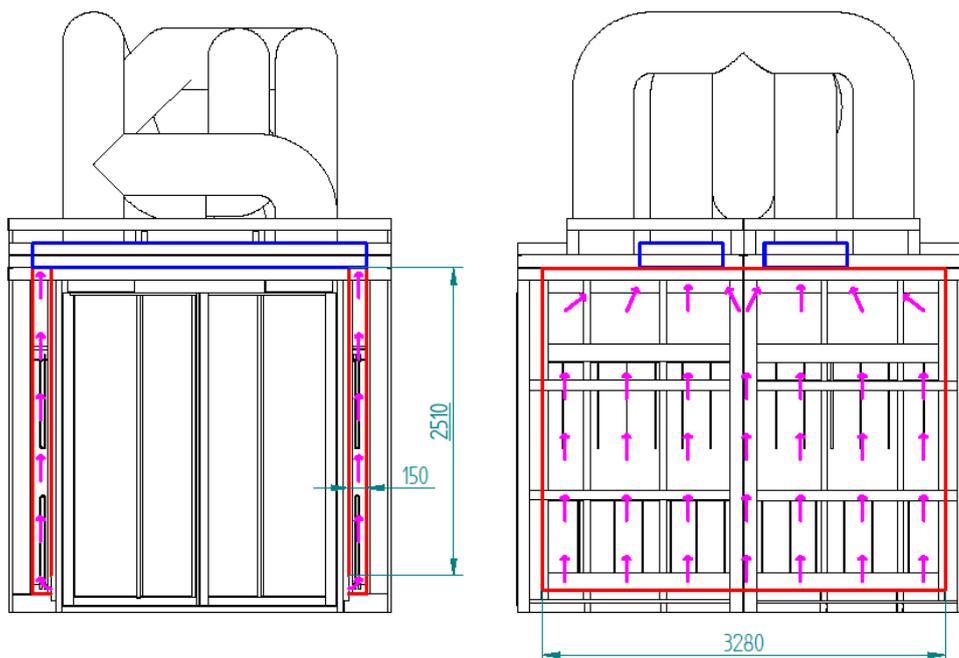


Рис. 2. Канал нагрева воздуха.

Канал нагрева воздуха находится с боку камеры. Согласно экспериментальным данным [5] коэффициент теплоотдачи при вынужденном движении воздуха со скоростью  $v = 4$  м/с (см. стр. 18) вдоль плоской стены длиной  $l = 2,72$  м при температуре  $500^{\circ}\text{C}$  равен  $\alpha_{500} = 7,75$  Вт/(м<sup>2</sup>·°C) (см. рис. 3).

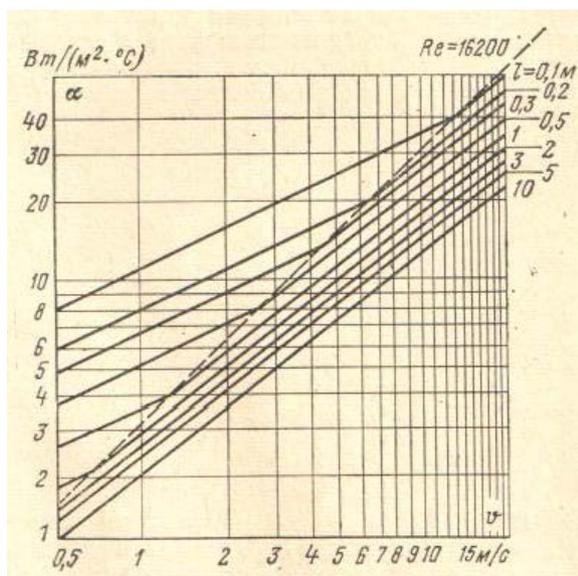


Рис. 3. Определение коэффициента теплоотдачи в циркуляционной печи [5].

Для определения коэффициента теплоотдачи при других температурах вводится температурная поправка  $\epsilon'_t$ ,

$$\alpha_t = \alpha_{500} \cdot \varepsilon'_t \quad (14)$$

При температуре 190°C температурная поправка составляет  $\varepsilon'_{190}=1,315$  (см. табл. 3.1.3.1).

Тогда коэффициент теплоотдачи

$$\alpha_{190} = \alpha_{500} \cdot \varepsilon'_{190} \quad (15)$$

$$\alpha_{190} = 7,75 \cdot 1,315 = 10,19 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C}) \quad (16)$$

Таблица 3.1.3.1. Температурная поправка в зависимости от температуры [5].

$t, \text{°C}$	0	100	190	200	300	400	500	600	800	1000
$\varepsilon'_t$	1,85	1,54	1,315	1,29	1,16	1,08	1	0,93	0,82	0,74

При температуре окружающего воздуха 20°C (см. стр. 15) и наружной температуре  $t_V=30^\circ\text{C}$  коэффициент теплоотдачи наружной поверхности  $\alpha_{30}=7,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  (см. табл. 3.1.3.2).

Таблица 3.1.3.2. Коэффициент теплоотдачи наружной поверхности  $\alpha_t, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$  [5].

$t, \text{°C}$	30	40	60	80	100	120	150	200	250	300	350	400	500
$t_{\text{возд}}=0 \text{°C}$	8,7	9,1	10	10,9	11,6	12,3	13,6	15,5	17,4	19,5	21,9	24,3	30,2
$t_{\text{возд}}=20 \text{°C}$	7,7	8,3	9,6	10,6	11,5	12,3	13,6	15,6	17,7	19,8	22,2	24,7	30,6

$$\begin{aligned}
 Q_{KK190} &= \frac{t_S - t_V}{\frac{1}{\alpha_{190} \cdot F_{M1}} + \frac{S_{M1}}{\lambda_{M1} \cdot F_{M1}} + \frac{S_P}{\lambda_P \cdot F_P} + \frac{S_R}{\lambda_R \cdot F_R} + \frac{S_{M2}}{\lambda_{M2} \cdot F_{M2}} + \frac{1}{\alpha_{30} \cdot F_{M2}}} = \\
 &= \frac{190 - 20}{\frac{1}{10,19 \cdot 47,787} + \frac{0,001}{56,6 \cdot 47,787} + \frac{0,025}{0,058 \cdot 48,644} + \frac{0,2}{0,049 \cdot 56,892} + \frac{0,001}{62,8 \cdot 64,284} + \frac{1}{7,7 \cdot 64,284}} = \\
 &= \frac{170}{2,05 \cdot 10^{-3} + 3,7 \cdot 10^{-7} + 8,86 \cdot 10^{-3} + 71,74 \cdot 10^{-3} + 2,48 \cdot 10^{-7} + 2,03 \cdot 10^{-3}} = 2006,8 \text{ Вт} \quad (17)
 \end{aligned}$$

где  $Q_{KK190}$  – тепловые потери стен корпуса камеры при максимальной температуре рабочей среды 190°C.

Определение тепловых потерь наружного воздушного тракта выполненного из трубы длиной 20,1 м и внутреннего диаметра 400 мм состоящей из двух слоев: оцинкованная сталь DC01 толщиной  $S=1$  мм и диаметром  $d_1=400$  мм, наружная сторона трубы покрыта PAROC Hvac Section AluCoat T толщиной 50 мм. Температурный перепад в стали DC01 толщиной  $S=1$  мм настолько мал, что им можно пренебречь. Средняя температура в слое Hvac Section AluCoat T  $(180+30)/2=105^\circ\text{C}$ .

Площадь поперечного сечения потока воздуха в трубе  $A_T$ :

$$A_T = d^2 \cdot \frac{\pi}{4} = 0,4^2 \cdot \frac{3,14}{4} = 0,1256 \text{ м}^2. \quad (18)$$

$A_V=0,1256 \text{ м}^2$ , расход воздуха в поперечном сечении трубы  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18).

$$v_T = \frac{Q}{A_T \cdot 2} = \frac{1,968}{0,1256} = 7,8 \text{ м/с}, \quad (19)$$

где  $v_T$  – скорость потока воздуха в трубе.

$$Re = \frac{v_T \cdot d}{\nu_{190}} = \frac{7,8 \cdot 0,4}{33,67 \cdot 10^{-6}} = 92664,1 > 4500 \quad (20)$$

Так как число Рейнольдса больше 4500, значит движение воздуха в трубе турбулентное.

Согласно экспериментальным данным [5] коэффициент теплоотдачи при турбулентном движении воздуха по трубе в функции от скорости воздуха  $v_T=7,8 \text{ м/с}$  (см. формулу 19), диаметром трубы  $d_1=400$  мм равен  $\alpha_{500}=12,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$  (см. рис. 4).

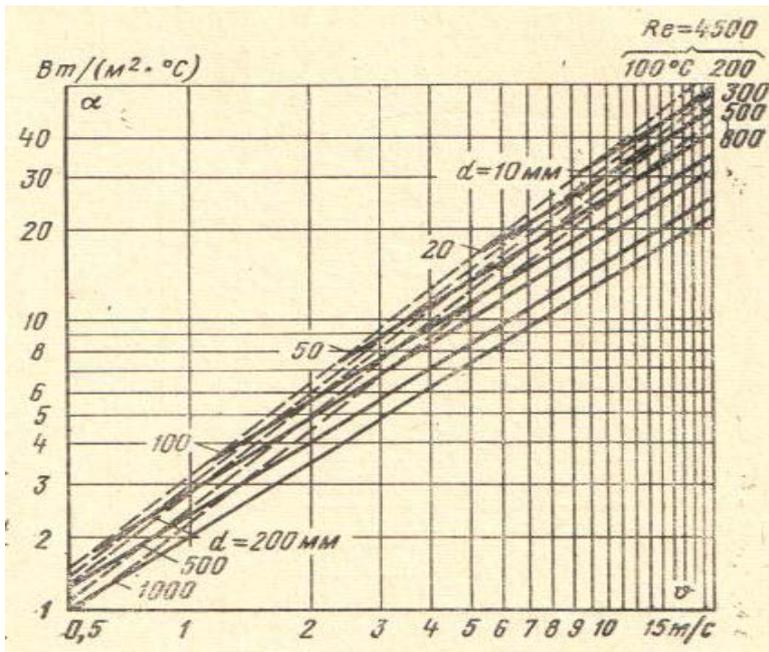


Рис. 4. Определение коэффициента теплоотдачи в циркуляционной печи [5].

Для определения коэффициента теплоотдачи при других температурах вводится температурная поправка  $\varepsilon'_t$ , тогда

$$\alpha_t = \alpha_{500} \cdot \varepsilon'_t . \quad (21)$$

При температуре 190 °С температурная поправка  $\varepsilon'_{190}=1,34$  (см. табл. 3.1.3.3),

$$\alpha_{190} = 12,5 \cdot 1,3 = 15 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С}) . \quad (22)$$

Таблица 3.1.3.3. Температурная поправка в зависимости от температуры [5].

t , °С	0	100	190	200	300	400	500	600	800	1000
$\varepsilon'_t$	1,82	1,52	1,34	1,32	1,18	1,07	1	0,94	0,83	0,74

$$\begin{aligned}
 Q_{KT190} &= \frac{\pi \cdot (t_s - t_v) \cdot H}{\frac{1}{\alpha_{190T} \cdot d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{M1}} \cdot \lg \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2 \cdot \lambda_{PH}} \cdot \lg \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\alpha_{30} \cdot d_3}} = \\
 &= \frac{\pi \cdot (190 - 20) \cdot 20,1}{\frac{1}{15 \cdot 0,4} + \frac{1}{2 \cdot 56,6} \cdot \lg \frac{0,402}{0,4} + \frac{1}{2 \cdot 0,043} \cdot \lg \frac{0,502}{0,402} + \frac{1}{7,65 \cdot 0,502}} = , \\
 &= \frac{10729,38}{0,167 + 4,4 \cdot 10^{-5} + 2,5831 + 0,2604} = 3563,93 \text{ Вт}
 \end{aligned} \quad (23)$$

где  $Q_{KT190}$  – средние тепловые потери наружного воздушного тракта камеры при максимальной температуре рабочей среды 190°С.

Таким образом, суммарные тепловы потери через ограждения  $Q_5$  составляют:

$$Q_5 = Q_{KK190} + Q_{KT190} = 2006,8 + 3563,93 = 5570,53 \text{ Вт} . \quad (24)$$

### 3.1.4. Тепло, необходимое для нагрева камеры

Каркас корпуса камеры полимеризации выполнен из U образных стальных швеллеров SFS5484 30/100/30x3 толщиной 3 мм и трубы 50x25x2 толщиной 2 мм, суммарный вес которых составляет  $m_{KAR}=1425$  кг (см. рис. 5). Наружная температура среды 20°С (см. стр. 15), рабочая температура внутренней среды 190°С (см. стр. 9). Приняв в расчет среднюю температуру, можно посчитать количество теплоты получаемое каркасом.

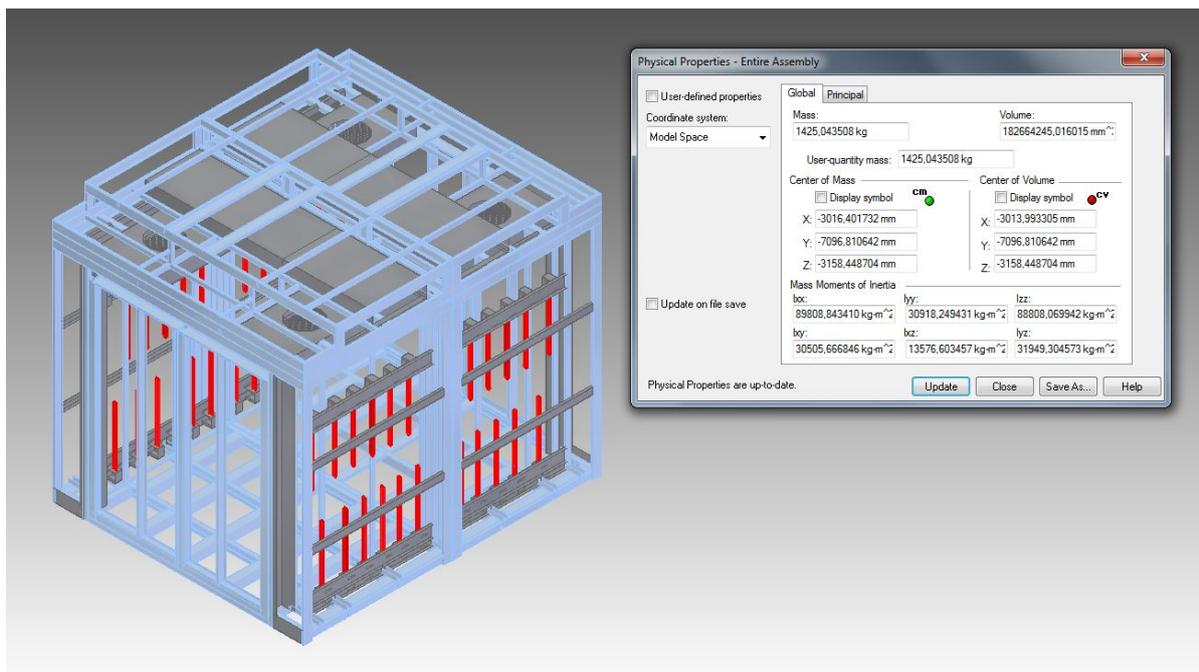


Рис. 5. Определение массы каркаса камеры полимеризации с помощью программного обеспечения Solid Edge.

$$\begin{aligned}
 Q_{KKAR} &= m_{KKAR} \cdot C_{TK} \cdot \left( \frac{t_2 - t_1}{2} \right) = m \cdot \left( \frac{C_{20} + C_{190}}{2} \right) \cdot (t_2 - t_1) = \\
 &= 1425 \cdot \left( \frac{482 + 512,4}{2} \right) \cdot (190 - 20) = 120,45 \text{ МДж}
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

где  $Q_{KKAR}$  – количество теплоты получаемое каркасом.

Принимаем, что разогрев камеры полимеризации до температуры рабочего режима 190°C занимает 60 минут. Этого времени достаточно для того, чтобы рабочий, включив печь в начале рабочей смены, успел подготовить первую партию изделий к покраске.

$$Q_{KKAR} = \frac{Q_{KKAR}}{60 \cdot 60} = \frac{120,45 \cdot 10^6}{3600} = 33457,42 \text{ Вт} .
 \tag{26}$$

### 3.1.5. Тепловые потери при загрузке и выгрузке изделий через открытые двери камеры

Производственный процесс включает в себя открытие и закрытие дверей камеры при загрузке и выгрузке окрашиваемых изделий. Можно посчитать тепловые потери при открытии дверей камеры.

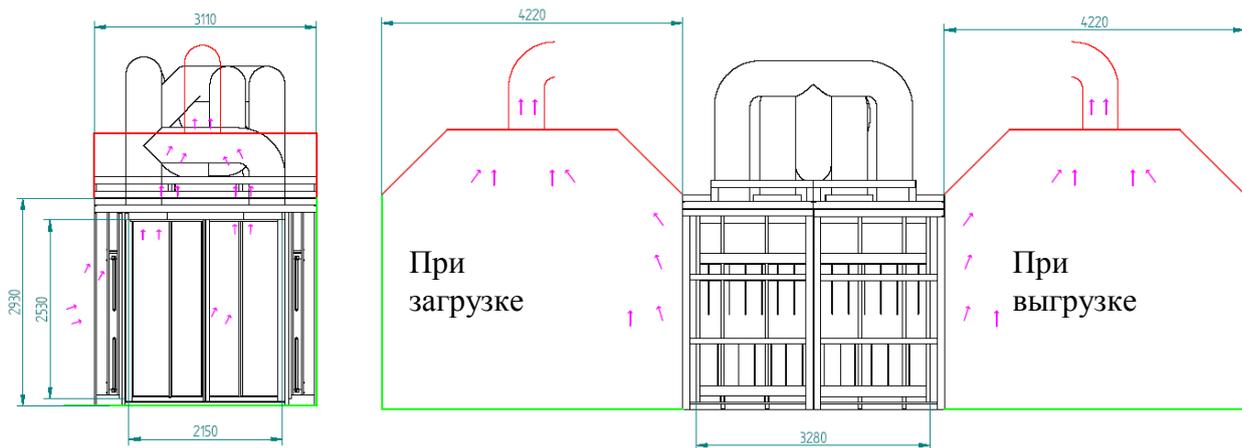


Рис. 6. Движение воздуха из камеры и цеха при открытии и закрытии дверей.

Ширина светового проема дверей  $C = 2150$  мм, высота светового проема дверей  $A = 2530$  мм и глубина печи  $B = 3280$  мм (см. рис. 6). Условно принимаем, что световой проем дверей имеет квадратную форму.

Отношение высоты и глубины печи:  $A/B = 2530/3280 = 0,77$ . (27)

Тепловые потери через открытую дверь определяются излучением и конвекцией.

Потери на излучение, Вт, рассчитываются по закону Стефана-Больцмана, причем нужно принять, что крупные отверстия, приближающиеся по своим параметрам к внутренним габаритам печной камеры – со степенью черноты  $\varepsilon = 0,8$  [5].

$$F_U = \frac{A \cdot C}{10^6} = \frac{2150 \cdot 2530}{10^6} = 5,44 \text{ м}^2, \quad (28)$$

$$q_{i\bar{o}} = \varepsilon \cdot 5,76 \cdot \left[ \left( \frac{T_{190^\circ}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{20^\circ}}{100} \right)^4 \right] \cdot F_U \cdot \psi = \quad (29)$$

$$= 0,8 \cdot 5,76 \cdot \left[ \left( \frac{190 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \cdot 5,44 \cdot 0,5 = 4836,03 \text{ Вт}$$

где  $q_{i\bar{o}}$  – тепловые потери на излучение;

$T_{190^\circ}$  – абсолютная температура рабочей камеры печи (см. стр. 9);

$T_{20^\circ}$  – абсолютная температура окружающего печь воздуха (см. стр. 15);

$F_U$  – площадь окна дверей (см. формулу 28);

$\psi$  – коэффициент диафрагмирования, учитывающий глубину камеры печи и экранирующее действие у стен равен 0,5 (см. рис. 7).

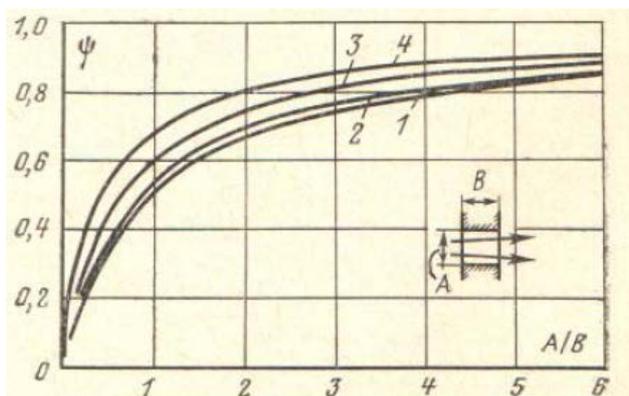


Рис. 5-6. Коэффициент диафрагмирования отверстий.

1 — круглое отверстие; 2 — квадратное; 3 — прямоугольное (соотношение сторон 2 : 1); 4 — длинная щель высотой A.

Рис. 7. Значения – коэффициента диафрагмирования [5].

Для определения тепловых потерь при конвекции задаемся, что производительность вентилятора вытяжки воздуха  $Q=2 \text{ м}^3/\text{с}$ . Если высота проема из цеха  $d=2930 \text{ мм}$  и ширина проема  $z=4220 \text{ мм}$ .

$$\text{Площадь проема: } F_{TSE} = d \cdot z = 12,36 \text{ м}^2. \quad (30)$$

Так в вытяжку попадает воздух из камеры, а так же воздух из цеха то вводим кратность воздуха:  $F_U / F_{TSE}$ .

Тогда вытяжка воздуха из печи при открывании дверей:

$$Q_U = Q \cdot \frac{F_U}{F_{TSE}} = 2 \cdot \frac{5,44}{12,36} = 0,88 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (31)$$

Удельная теплоемкость сухого воздуха  $C_{20}=10^3 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ , удельная теплоемкость сухого воздуха  $C_{190}=1,03 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot^\circ\text{C}$  при температуре  $190^\circ\text{C}$  при давлении  $p=100 \text{ кПа}$  [5].

Тепловые потери при конвекции :

$$\begin{aligned} q_{KON\bar{O}} &= Q_U \cdot C_{105} \cdot (t_2 - t_1) = Q_U \cdot \frac{(C_{20} + C_{190})}{2} \cdot (t_2 - t_1) = \\ &= 0,88 \cdot \left( \frac{10^3 + 1,03 \cdot 10^3}{2} \right) \cdot (190 - 20) = 151844 \text{ Дж} \end{aligned} \quad (32)$$

где  $q_{KON\bar{O}}$  – тепловые потери при конвекции;

$Q_U$  – количество теплоты получаемое телом (см. формулу 31);

$C_{105}$  – средняя удельная теплоемкость воздуха при температуре от  $20^\circ\text{C}$  до  $190^\circ\text{C}$ ;

$t_1$  – температура воздуха в цеху (см. стр. 15);

$t_2$  – максимальная температура камеры при полимеризации краски (см. стр. 9).

Принимаем, что открытие и закрытие дверей камеры полимеризации при загрузке или выгрузке изделий занимает 1 минуту. Тогда время затраченное на загрузку и выгрузку изделий  $\tau_{UTS}$  в один полный цикл равняется 2 минуты или 120 секунд.

Тогда тепловые потери при конвекции за один полный цикл равны:

$$q_{KON\bar{O}} = \frac{q_{KON\bar{O}}}{\tau_{UTS}} = \frac{151844}{120} = 1265,37 \text{ Вт} . \quad (33)$$

Тогда,

$$Q_{K\bar{O}} = q_{I\bar{O}} + q_{KON\bar{O}} = 4836,03 + 1265,37 = 6101,4 \text{ Вт} , \quad (34)$$

где  $Q_{K\bar{O}}$  – количество теплоты выходящее при открытых дверях камеры во время загрузке и выгрузке изделий из камеры в один полный цикл.

### **3.1.6. Тепло, необходимое для нагрева вспомогательного оборудования**

Вспомогательное тепло складывается из тепла, идущего на нагрев транспортных элементов используемых для перемещения изделий по транспортной линии. Масса транспортного элемента 2 кг. Элементы выполнены из стального круглого проката диаметром 5мм. Камера рассчитана для полимеризации одновременно четырёх изделий максимальных габаритов. На одно изделие предусмотрено два крепежных элемента. Значит суммарная масса элементов  $2 \cdot 4 \cdot 2 = 16$  кг. Учитывая, что температура механизма в зоне нанесения порошковой краски 20 °С, а температура до которой прогревается механизм в печи 180-190 °С, можно посчитать количество теплоты, получаемое всеми восемью элементами.

$$\begin{aligned} Q_{TR} &= 4 \cdot m_{TR} \cdot C_{TK} \cdot (t_2 - t_1) = 4 \cdot m \cdot \left( \frac{C_{20} + C_{190}}{2} \right) \cdot (t_2 - t_1) = \\ &= 16 \cdot \left( \frac{482 + 512,4}{2} \right) \cdot (190 - 20) = 1,35 \text{ МДж} \end{aligned} \quad (35)$$

где  $Q_{TR}$  – количество теплоты получаемое транспортными элементами;

$C_{TK}$  – средняя удельная теплоемкость стали DC01 при температуре от 20 °С до 190 °С (см. табл. 2.2.2);

$t_1$  – температура изделия в зоне нанесения порошковой краски (см. стр. 15);

$t_2$  – максимальная рабочая температура камеры (см. стр. 9).

### 3.2. Уравнение энергетического баланса

Для печей периодического действия тепловой баланс составляют на один цикл работы.

Один полный цикл в общем виде:  $\tau_{\text{цикл}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{пр}}$ , (36)

где  $\tau_{\text{цикл}}$  - время цикла;

$\tau_{\text{нагр}}$  - время необходимое для нагрева изделий (время полимеризации порошковой краски) 15 минут (см. стр. 9);

$\tau_{\text{пр}}$  - время загрузки и выгрузки изделий (время простоя) 2 минуты (см. стр. 26).

Время выдержки изделий в печи задается технологическим процессом (см. стр. 9), время загрузки и выгрузки изделий получено опытным путем. Опытным путем получено, что двери камеры открываются примерно на 1 минуту для загрузки или выгрузки изделий (см. стр. 26).

$$\tau_{\text{цикл}} = \tau_{\text{нагр}} + \tau_{\text{пр}} = 15 \cdot 60 + 2 \cdot 60 = 1020 \text{ с} \quad (37)$$

Выделяющееся в нагревателях за время одного цикла тепло идет на нагрев изделий, вспомогательное тепло и покрытие тепловых потерь.

$$Q_S = K \cdot \left( \frac{Q_{TR} + Q_T}{\tau_{\text{цикл}}} + Q_5 + Q_{KO} \right) = 1,35 \cdot \left( \frac{1,35 \cdot 10^6 + 21,3 \cdot 10^6}{1020} + 5570,53 + 6101,4 \right) = 45,7 \text{ кВт} \quad (38)$$

где  $Q_S$  – необходимое количество теплоты вырабатываемое ТЭНами для существования теплового баланса;

$K$  – коэффициент запаса.

$K$  – коэффициент запаса вводится для того, чтобы обеспечить повышенную теплоотдачу изделиям в первый этап нагрева изделий; кроме того, им предусматриваются возможное ухудшение тепловой изоляции печи в эксплуатации, старение нагревателей, возможное снижение напряжения в цехе против номинального на 5-10% и другие местные обстоятельства, учесть которые при проектировании невозможно.

$$Q_{AL} = K \cdot (Q_5 + Q_{KKAR}) = 1,35 \cdot (5570,53 + 33457,42) = 52,7 \text{ кВт} \quad (39)$$

где  $Q_{AL}$  – необходимое количество теплоты вырабатываемое ТЭНами для нагрева печи до рабочей температуры в заданое время 60 мин (см. стр. 23).

Тепловой баланс печи состоит из равных между собой приходной и расходной частей. Таким образом, на основе рассчитанных величин можно составить тепловой баланс печи и определить необходимую мощность ТЭНов. Так как необходимое количество теплоты вырабатываемое ТЭНами для существования теплового баланса во время работы  $Q_S$  меньше, чем необходимое количество теплоты вырабатываемое ТЭНами для нагрева печи до рабочей температуры  $Q_{AL}$ , то выбор количества и мощности ТЭНов проводим по большему необходимому количеству тепла.

Нагрев камеры полимеризации осуществляется отдельными восьмью термоблоками, которые отдельно монтируется в камере. Конструкция камеры рассчитана на 48 шт. ТЭН.

$$Q_{VT} = Q_{AL} / 48 = 52,7 \cdot 10^3 / 48 = 1,1 \text{ кВт} , \quad (40)$$

где  $Q_{VT}$  – расчетное минимальное количество теплоты вырабатываемое одним ТЭНом.

Мощность одного ТЭНа должна быть более 1,1 кВт. Выбор ТЭН подробно описывается в главе 5.1. Трубчатый электронагреватель (см. стр. 47).

## 4. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

### 4.1. Теоретические основы расчета потерь давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в каналах

Камера полимеризации снабжена вентилятором, при помощи которого происходит равномерное распределение воздуха при ламинарном потоке в камере внутри канала с ТЭНами с рекомендованной скоростью 4 м/с (см. стр. 18). Это позволяет получить минимальную погрешность температуры воздуха в различных точках печи по всему объему не более и не менее 3 градусов. Площадь канала равна  $S_{KAN}=0,492 \text{ м}^2$ , а расход воздуха в поперечном сечении канала  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18).

Потери давления при преодолении гидравлических сопротивлений  $p_t$  (м) разделяются на две группы:  $p_n = \sum p_l + \sum p_k$ ,

(41)

где  $p_l$  – потери, затрачиваемые на преодоление сопротивления трения (линейные потери), Па;

$p_k$  – потери, вызываемые резким изменением конфигурации границ потока (местные потери), Па.

Линейные потери определяются по уравнению Дарси для трубы круглого поперечного

сечения:  $p_l = \lambda \cdot \frac{L}{D_g} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho$ , (42)

где  $\lambda$  – безразмерный коэффициент сопротивления трения (коэффициент Дарси);

$D_g$  – гидравлический диаметр, м;

$L$  и  $D$  – длина и диаметр трубопровода, м;

$\rho$  – плотность (плотность воздуха при температуре 190°C  $\rho=0,7634 \text{ кг/м}^3$  [5]);

$v$  – средняя скорость потока, м/с.

Линейные потери для каналов прямоугольного сечения:

$$p_l = \lambda \cdot \frac{L}{D_g} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = \lambda \cdot \frac{L \cdot (a+b)}{2 \cdot a \cdot b} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = \lambda \cdot \frac{L \cdot (a+b) \cdot v^2}{4 \cdot a \cdot b} \cdot \rho, \quad (43)$$

$$D_g = \frac{4 \cdot A}{z}, \quad (44)$$

где  $a$  и  $b$  – высота и ширина канала, м;

$A$  - площадь поперечного сечения потока воздуха,  $\text{м}^2$ ;

$z$  - смоченный периметр поперечного сечения потока, м.

Местные потери вычисляются по формуле Вейсбаха:

$$P_k = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho, \quad (45)$$

где  $\zeta$  – безразмерный коэффициент местного сопротивления, к которому относятся поворот, сужение или расширение потока, а также различные гидравлические устройства (вентили, жиклеры и т.д.).

#### 4.2. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале нагрева воздуха

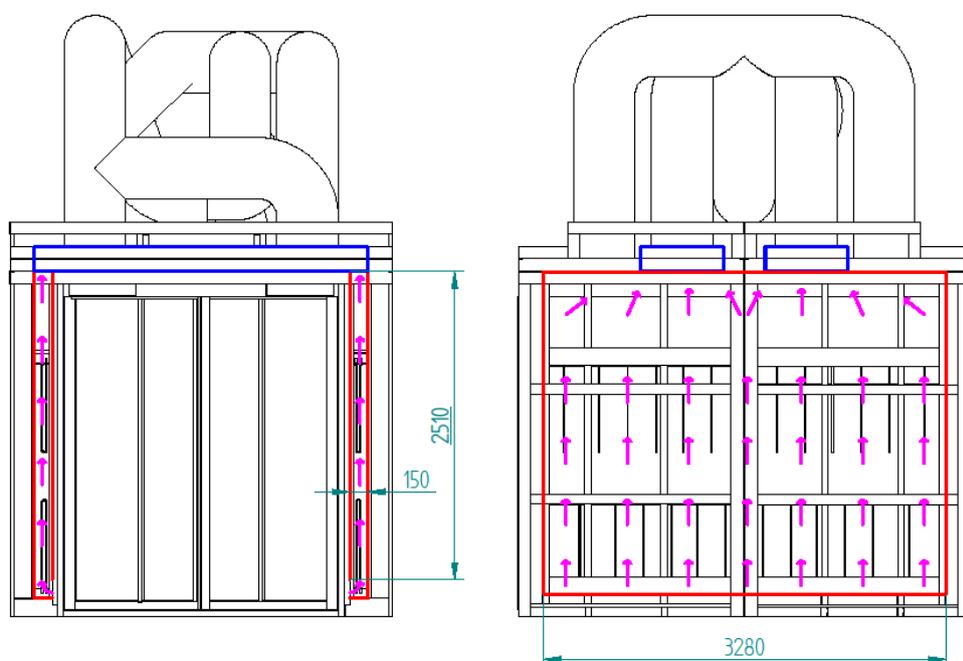


Рис. 9. Размеры канала нагрева воздуха.

$$D_g = \frac{4 \cdot A}{z} = \frac{4 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (a + b)} = \frac{4 \cdot 0,15 \cdot 3,28}{2 \cdot (0,15 + 3,28)} = 0,287 \text{ м}, \quad (46)$$

$$Re = \frac{v \cdot D_g}{\nu_{190}} = \frac{4 \cdot 0,287}{33,67 \cdot 10^{-6}} = 34095 > 4500, \quad (47)$$

где  $\nu_{190}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при максимальной температуре рабочей среды  $190^\circ\text{C}$  [5];

$D_g$  – гидравлический диаметр в канале нагрева воздуха, м;

$a$  - ширина канала 0,15 м (см. рис. 9);

$b$  - высота канала 3,28 м (см. рис. 9);

$A$  - площадь поперечного сечения потока в канале нагрева воздуха, м<sup>2</sup>;

$z$  - смоченный периметр поперечного сечения потока канала нагрева воздуха, м;

$v$  - скорость потока в канале нагрева воздуха, согласно рекомендациям

$v = 4$  м/с (см. стр. 18).

$$10 \cdot \frac{D_g}{\Delta_e} \leq \text{Re} \leq 500 \cdot \frac{D_g}{\Delta_e}; \quad 10 \cdot \frac{287}{0,15} \leq \text{Re} \leq 500 \cdot \frac{287}{0,15}; \quad 19133 < 34095 < 956667. \quad (48)$$

Так как число Рейнольдса больше 4500, значит движение воздуха в канале нагрева воздуха турбулентное. Зона смешанного трения или гидравлически шероховатых труб.

Трубы оцинкованные стальные и абсолютная шероховатость  $\Delta_e = 0,15$  мм [7].

Безразмерный коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta_e}{D_g} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,15}{287} + \frac{68}{34095} \right)^{0,25} = 0,025. \quad (49)$$

Линейные потери в канале нагрева воздуха прямоугольного сечения (см. стр. 29).

Длина канала нагрева воздуха  $L = 3,28$  м (см. рис. 9).

$$p_l = \lambda \cdot \frac{L}{D_g} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = 0,025 \cdot \frac{2,51}{0,287} \cdot \frac{4^2}{2} \cdot 0,7634 = 1,34 \text{ Па} \quad (50)$$

Местные потери в канале нагрева воздуха прямоугольного сечения (см. стр. 30).

Поворот 90° с острым углом. Коэффициент местного гидравлического сопротивления  $\xi = 1,265$  [7].

$$p_{k1} = \xi \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = 1,265 \cdot \frac{4^2}{2} \cdot 0,7634 = 7,73 \text{ Па} \quad (51)$$

Два перехода 0,15x0,67 м в два канала оттока воздуха - резкое сужение. Коэффициент местного гидравлического сопротивления:

$$\zeta = 0,5 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{d_{gk1}}{D_g} \right)^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,123}{0,287} \right)^2 \right] = 0,4. \quad (52)$$

$$d_{gk1} = \frac{4 \cdot A}{2 \cdot z} = \frac{4 \cdot 0,15 \cdot 0,67}{4 \cdot (0,15 + 0,67)} = 0,123 \text{ м} \quad (53)$$

$$p_{k2} = \zeta \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho = 0,4 \cdot \frac{4^2}{2} \cdot 0,7634 = 2,44 \text{ Па}$$

(54)

Потери давления  $P$  при преодолении гидравлических сопротивлений в канале нагрева воздуха, Па:

$$P = p_l + p_{k1} + p_{k2} = 1,34 + 7,73 + 2,44 = 11,51 \text{ Па} .$$
 (55)

### 4.3. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале оттока воздуха „К1“

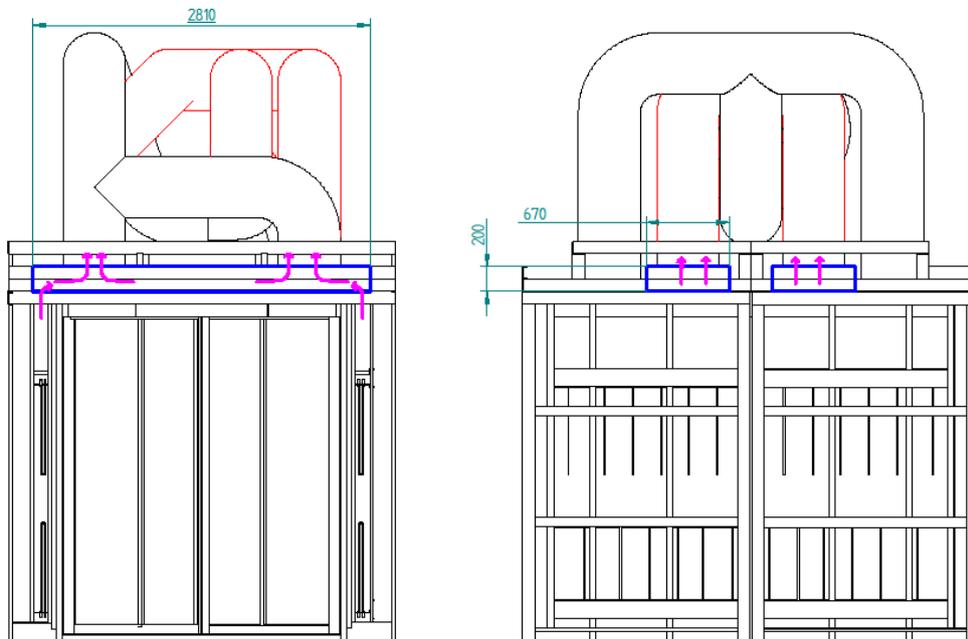


Рис. 10. Размеры канала оттока воздуха „К1“.

Зная площадь поперечного сечения потока воздуха в канале оттока и расход воздуха в поперечном сечении канала  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18), можно вычислить скорость потока в канале.

$$v_{K1} = \frac{Q}{A_{K1}} = \frac{Q}{a_{K1} \cdot b_{K1}} = \frac{1,968}{0,2 \cdot 0,67} = 14,69 \text{ м/с}$$
 (56)

где  $v_{K1}$  – скорость потока в канале оттока воздуха „К1“, м/с;

$a_{K1}$  – ширина канала оттока воздуха „К1“ 0,67 м (см. рис. 10);

$b_{K1}$  – высота канала оттока воздуха „К1“ 0,2 м (см. рис. 10).

$$D_{gK1} = \frac{4 \cdot A_{K1}}{z_{K1}} = \frac{4 \cdot b_{K1} \cdot a_{K1}}{2 \cdot (b_{K1} + a_{K1})} = \frac{4 \cdot 0,2 \cdot 0,67}{2 \cdot (0,2 + 0,67)} = 0,308 \text{ м} \quad (57)$$

$$Re = \frac{v_{K1} \cdot D_{gK1}}{\nu_{190}} = \frac{14,69 \cdot 0,308}{33,67 \cdot 10^{-6}} = 134378 > 4500 \quad (58)$$

где  $\nu_{190}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при максимальной температуре рабочей среды 190°C [5];

$D_{gK1}$  – гидравлический диаметр канала оттока воздуха „K1“, м;

$a_{K1}$  – ширина канала 0,67 м (см. рис. 10);

$b_{K1}$  – высота канала 0,2 м (см. рис. 10);

$A_{K1}$  – площадь поперечного сечения потока воздуха в канале оттока воздуха „K1“, м<sup>2</sup>;

$z_{K1}$  – смоченный периметр поперечного сечения потока в канале оттока воздуха „K1“, м;

$v_{K1}$  – скорость потока в канале оттока воздуха „K1“, м/с (см. формулу 56).

$$10 \cdot \frac{D_{gK1}}{\Delta_e} \leq Re \leq 500 \cdot \frac{D_{gK1}}{\Delta_e}; \quad 10 \cdot \frac{287}{0,15} \leq Re \leq 500 \cdot \frac{308}{0,15}; \quad 20533 < 134378 < 1026667. \quad (59)$$

Так как число Рейнольдса больше 4500, значит движение воздуха в канале оттока турбулентное. Зона смешанного трения или гидравлически шероховатых труб.

Трубы оцинкованные стальные и абсолютная шероховатость  $\Delta_e = 0,15$  мм [7].

Безразмерный коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda_{K1} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta_e}{D_{gK1}} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,15}{308} + \frac{68}{134378} \right)^{0,25} = 0,0195. \quad (60)$$

Линейные потери в канале оттока прямоугольного сечения (см. стр. 29).

Длина канала оттока воздуха  $L_{K1} = 2,81$  м (см. рис. 10).

$$p_{lK1} = \lambda_{K1} \cdot \frac{L_{K1}}{D_{gK1}} \cdot \frac{v_{K1}^2}{2} \cdot \rho = 0,0195 \cdot \frac{2,81}{0,308} \cdot \frac{14,69^2}{2} \cdot 0,7634 = 14,65 \text{ Па} \quad (61)$$

Местные потери в канале оттока воздуха прямоугольного сечения (см. стр. 30).

Поворот 90° с острым углом. Коэффициент местного гидравлического сопротивления

$\xi_{K11} = 1,265$  [7].

$$p_{kk11} = \xi_{K11} \cdot \frac{v_{K1}^2}{2} \cdot \rho = 1,265 \cdot \frac{14,69^2}{2} \cdot 0,7634 = 104,2 \text{ Па} \quad (62)$$

Переход в канал наружного воздушного тракта - резкое расширение. Коэффициент местного гидравлического сопротивления:

$$\zeta_{K12} = \left[ 1 - \left( \frac{D_{gK1}}{D_T} \right)^2 \right]^2 = \left[ 1 - \left( \frac{0,308}{0,4} \right)^2 \right]^2 = 0,166 \quad . \quad (63)$$

$$P_{KK12} = \zeta_{K12} \cdot \frac{v_{K2}^2}{2} \cdot \rho = 0,166 \cdot \frac{14,69^2}{2} \cdot 0,7634 = 13,67 \text{ Па} \quad (64)$$

Потери давления  $P_{K1}$  при преодолении гидравлических сопротивлений в канале оттока воздуха „K1“, Па:

$$P_{K1} = P_{IK1} + P_{IK11} + P_{IK12} = 14,65 + 104,2 + 13,67 = 132,5 \text{ Па} . \quad (65)$$

#### 4.4. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале наружного воздушного тракта

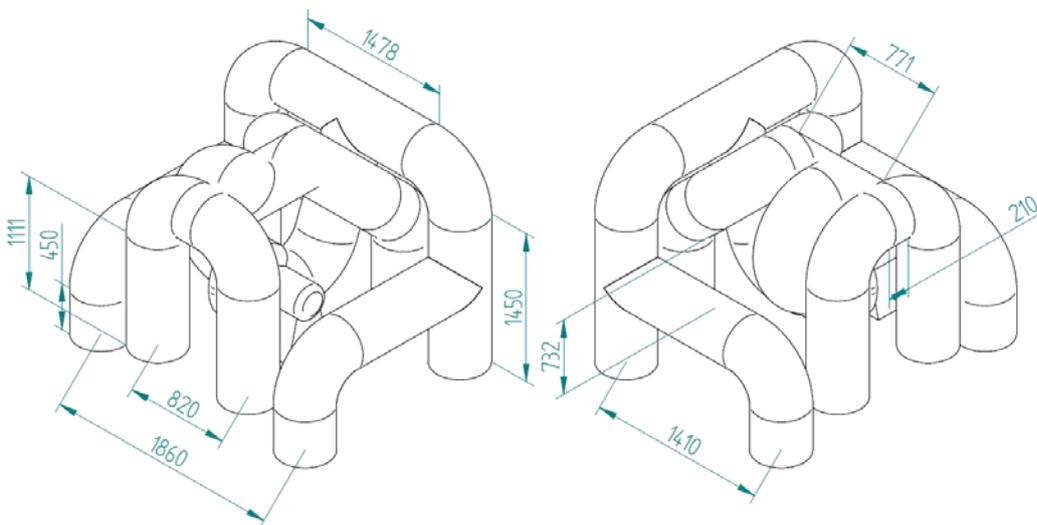


Рис. 11. Размеры канала наружного воздушного тракта.

Движение воздуха в канале наружного воздушного тракта турбулентное (см. формулу 20). Зона смешанного трения или гидравлически шероховатых труб. Трубы оцинкованные стальные с соединительным швом и абсолютная шероховатость  $\Delta_e = 0,15$  мм [7].

$$10 \cdot \frac{D_T}{\Delta_e} \leq Re \leq 500 \cdot \frac{D_T}{\Delta_e}; \quad 10 \cdot \frac{400}{0,15} \leq Re \leq 500 \cdot \frac{400}{0,15}; \quad 8000 < 92664 < 400000. \quad (66)$$

Безразмерный коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Альтшуля:

$$\lambda_T = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta_e}{D_T} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,5}{400} + \frac{68}{92664,1} \right)^{0,25} = 0,0232 . \quad (67)$$

Линейные потери в канале наружного воздушного тракта круглого сечения (см. стр. 29).

Длина канала канала наружного воздушного тракта получена с помощью программного обеспечения Solid Edge  $L_T = 22,542$  м (см. рис. 11).

$$P_{\text{лр}} = \lambda_D \cdot \frac{L_T}{D_T} \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 0,0232 \cdot \frac{22,542}{0,4} \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 30,36 \text{ Па} , \quad (68)$$

где  $v_T$  – скорость воздуха в канале наружного воздушного тракта 7,8 м/с (см. формулу 19).

Местные потери в канале наружного воздушного тракта круглого сечения (см. стр. 30):

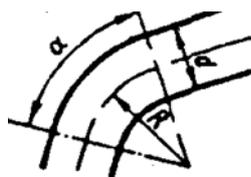


Рис. 12. Поворот трубы.

Таблица 4.1.3.1. Коэффициент гидравлического местного сопротивления в зависимости от угла поворота трубы [7].

$\alpha^\circ$	$90^\circ$	$110^\circ$	$135^\circ$	$180^\circ$
$\xi_{90^\circ}$	0,51	0,51	0,51	0,51
$K$	1	1,1	1,22	1,41

Два поворота  $135^\circ$  (см. рис. 12), радиус поворота 400 мм.

$$\xi_{135^\circ} = \xi_{90^\circ} \cdot K_{135^\circ} = 0,51 \cdot 1,22 = 0,6222 \text{ (см. табл. 4.1.3.1.)} \quad (69)$$

$$P_{\text{кТ}135^\circ} = \xi_{135^\circ} \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 0,6222 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 14,45 \text{ Па} \quad (70)$$

Восемь поворотов  $90^\circ$  (см. рис. 12), радиус поворота 400 мм.

$$\xi_{90^\circ} = \xi_{90^\circ} \cdot K_{90^\circ} = 0,51 \cdot 1 = 0,51 \text{ (см. табл. 4.1.3.1.)} \quad (71)$$

$$P_{\text{кТ}90^\circ} = \xi_{90^\circ} \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 0,51 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 11,84 \text{ Па} \quad (72)$$

Один поворот  $180^\circ$  (см. рис. 12), радиус поворота 400 мм.

$$\xi_{180^\circ} = \xi_{90^\circ} \cdot K_{180^\circ} = 0,51 \cdot 1,41 = 0,7191 \text{ (см. табл. 4.1.3.1.)} \quad (73)$$

$$P_{KT180^\circ} = \xi_{180^\circ} \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 0,7191 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 16,7 \text{ Па} \quad (74)$$

Один поворот  $110^\circ$  (см. рис. 12), радиус поворота 400мм.

$$\xi_{110^\circ} = \xi_{90^\circ} \cdot K_{110^\circ} = 0,51 \cdot 1,1 = 0,561 \text{ (см. табл. 4.1.3.1.)} \quad (75)$$

$$P_{KT110^\circ} = \xi_{110^\circ} \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 0,561 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 13,03 \text{ Па} \quad (76)$$

«Г» соединение тип А. 2 шт. (см. рис. 12).

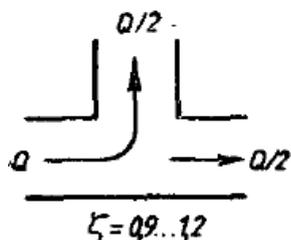


Рис. 12. Коэффициент местного гидравлического сопротивления при «Г» соединении типа А.

Выбираем коэффициент местного гидравлического сопротивления  $\zeta = 1,05$  (см. рис. 12).

$$P_{KTA} = \zeta \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 1,05 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 24,38 \text{ Па}$$

(77)

«Г» соединение тип В. 1 шт. (см. рис. 13).

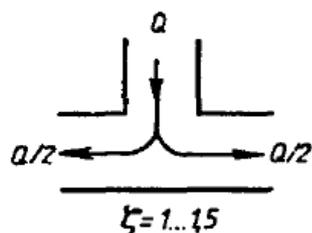


Рис. 13. Коэффициент местного гидравлического сопротивления при «Г» соединении типа В.

Выбираем коэффициент местного гидравлического сопротивления  $\zeta = 1,25$  (см. рис. 13).

$$P_{КТВ} = \zeta \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 1,25 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 29,03 \text{ Па} \quad (78)$$

«Г» соединение тип С. 3 шт. (см. рис. 14)

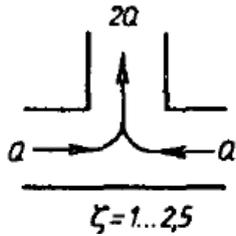


Рис. 14. Коэффициент местного гидравлического сопротивления при «Т» соединении типа С.

Выбираем коэффициент местного гидравлического сопротивления  $\zeta = 1,75$  (см. рис. 14).

$$p_{кТС} = \zeta \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 1,75 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 40,64 \text{ Па} \quad (79)$$

Местные потери при переходе из вентилятора в канал наружного воздушного тракта круглого сечения (см. стр. 30) - резкое расширение (см. рис. 15).

$$d_{gU} = \frac{4 \cdot A_U}{z_U} = \frac{4 \cdot E \cdot F}{2 \cdot (E + F)} = \frac{4 \cdot 0,249 \cdot 0,32}{2 \cdot (0,249 + 0,32)} = 0,28 \text{ м} \quad (80)$$

где  $E$  - ширина перехода из вентилятора 0,249 м (см. рис. 15);

$F$  - высота перехода из вентилятора 0,32 м (см. рис. 15);

$z_U$  - смоченный периметр поперечного сечения потока в переходе из вентилятора в канал наружного воздушного тракта, м;

$d_{gU}$  - гидравлический диаметр перехода из вентилятора, м.

Зная площадь поперечного сечения потока воздуха в переходе из вентилятора в канал наружного воздушного тракта и расход воздуха в поперечном сечении канала  $Q = 1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18), можно вычислить скорость потока в канале  $v_U$ .

$$v_U = \frac{Q}{A_U} = \frac{Q}{F \cdot E} = \frac{1,968}{0,32 \cdot 0,249} = 24,7 \text{ м/с} \quad (81)$$

Таблица 4.1.3.2. Коэффициент гидравлического местного сопротивления в зависимости от отношения гидравлических диаметров [7].

$\left(\frac{d_{gU}}{D_T}\right)^2$	0	0,4	0,49	0,6
$\xi$	1	0,36	0,27	0,16

$$\left(\frac{d_{gU}}{D_T}\right)^2 = 0,49 \quad (82)$$

Выбираем коэффициент местного гидравлического сопротивления  $\zeta = 0,27$  (см. табл. 4.1.3.2.).

$$p_{кУ} = \zeta \cdot \frac{v_U^2}{2} \cdot \rho = 0,27 \cdot \frac{24,7^2}{2} \cdot 0,7634 = 62,86 \text{ Па} \quad (83)$$

Местные потери при переходе двух каналов наружного воздушного тракта в канал притотка - резкое расширение (см. стр. 30).

$$S_T = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,4^2}{4} = 0,1257 \text{ м}^2 \quad (84)$$

$$z_T = \pi \cdot d^2 = \pi \cdot 0,4^2 = 1,2566 \text{ м} \quad (85)$$

$$d_{гТх2} = \frac{4 \cdot S_T}{2 \cdot p_T} = \frac{2 \cdot 0,1257}{1,2566} = 0,2 \text{ м} \quad (86)$$

где  $S_T$  – площадь поперечного сечения потока воздуха в канале наружного воздушного тракта, м<sup>2</sup>;

$z_T$  – смоченный периметр поперечного сечения потока в канале наружного воздушного тракта, м;

$d_{гТх2}$  – гидравлический диаметр в переходе двух каналов наружного воздушного тракта в канал притотка, м.

Коэффициент местного гидравлического сопротивления при переходе двух в каналов наружного воздушного тракта в канал притотка - резкое расширение.

$$\zeta_{TK} = \left[ 1 - \left( \frac{d_{гТх2}}{D_{гК2}} \right)^2 \right]^2 = \left[ 1 - \left( \frac{0,2}{1,11} \right)^2 \right]^2 = 0,936 \quad (87)$$

где  $d_{гТх2}$  – гидравлический диаметр при переходе двух в каналов наружного воздушного тракта в канал притотка, м.

$$p_{кТК} = \zeta_{к2} \cdot \frac{v_T^2}{2} \cdot \rho = 0,936 \cdot \frac{7,8^2}{2} \cdot 0,7634 = 21,74 \text{ Па} \quad (88)$$

Потери давления  $P_T$  при преодолении гидравлических сопротивлений в канале наружного воздушного тракта, Па:

$$\begin{aligned} P_T &= p_{IT} + 2 \cdot p_{кТ135^\circ} + 8 \cdot p_{кТ90^\circ} + p_{кТ180^\circ} + p_{кТ110^\circ} + 2 \cdot p_{кТА} + p_{кТВ} + 3 \cdot p_{кТС} + p_{кУ} + p_{кТК} = \\ &= 30,36 + 2 \cdot 14,45 + 8 \cdot 11,84 + 16,7 + 13,03 + 2 \cdot 24,38 + 29,03 + 3 \cdot 40,64 + 62,86 + 21,74 = \\ &= 468,02 \text{ Па} \end{aligned}$$

(89)

#### 4.5. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в канале притока воздуха „K2“

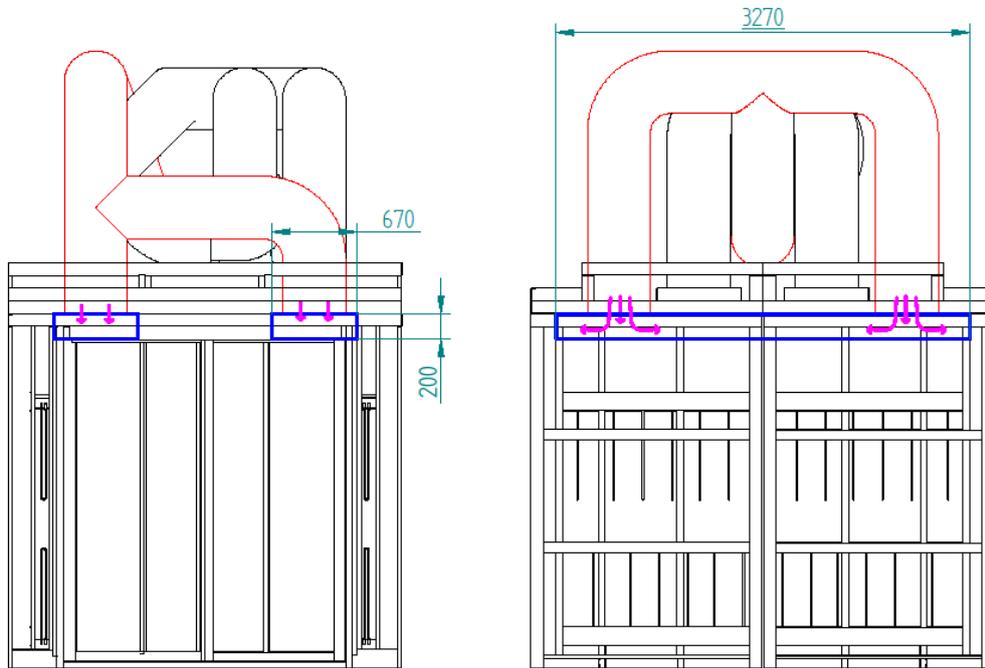


Рис. 15. Размеры канала притока воздуха „K2“.

Зная площадь поперечного сечения потока воздуха в канале притока и расход воздуха в поперечном сечении канала  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18), можно вычислить скорость потока в канале.

$$v_{K2} = \frac{Q}{A_{K2}} = \frac{Q}{a_{K2} \cdot b_{K2}} = \frac{1,968}{0,67 \cdot 0,2} = 0,899 \text{ м/с} \quad (90)$$

где  $v_{K2}$  – скорость потока в канале оттока воздуха „K2“, м/с;

$a_{K2}$  – ширина канала оттока воздуха „K2“ 0,67 м (см. рис. 15);

$b_{K2}$  – высота канала оттока воздуха „K2“ 0,2 м (см. рис. 15).

$$D_{gK2} = \frac{4 \cdot A_{K2}}{z_{K2}} = \frac{4 \cdot 3,27 \cdot 0,67}{2 \cdot (3,27 + 0,67)} = 1,11 \text{ м} \quad (91)$$

$$\text{Re} = \frac{v_{K2} \cdot D_{gK2}}{\nu_{190}} = \frac{0,899 \cdot 1,11}{33,67 \cdot 10^{-6}} = 29637 > 4500 \quad (92)$$

где  $v_{190}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при максимальной температуре рабочей среды 190°C [5];

$D_{gK2}$  – гидравлический диаметр канала притока воздуха „K2“, м;

$A_{K2}$  – площадь поперечного сечения потока воздуха в канале притока воздуха „K2“, м<sup>2</sup>;

$z_{K2}$  – смоченный периметр поперечного сечения потока в канале притока воздуха „K2“, м;

$v_{K1}$  – скорость потока в канале притока воздуха „K2“, м/с (см. формулу 90).

Так как число Рейнольдса больше 4500, значит движение воздуха в каналах притока турбулентное. Зона гидравлически гладких труб. Трубы оцинкованные стальные и абсолютная шероховатость  $\Delta_e = 0,15$  мм [7].

$$4000 < Re < 10 \cdot \frac{D_{gK2}}{\Delta_e}; \quad 4000 < 29637 < 10 \cdot \frac{1110}{0,15}; \quad 4000 < 29637 < 74000. \quad (93)$$

Безразмерный коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda_{K2} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{29637}} = 0,0241 \quad (94)$$

Линейные потери в канале притока прямоугольного сечения (см. стр. 29).

$$p_{lK2} = \lambda_{K2} \cdot \frac{L_{K2}}{D_{gK2}} \cdot \frac{v_{K2}^2}{2} \cdot \rho = 0,0241 \cdot \frac{0,2}{1,11} \cdot \frac{0,899^2}{2} \cdot 0,7634 = 0,0013 \text{ Па} \quad (95)$$

Местные потери при переходе из канала притока в пустую зону камеры (см. стр. 30).

Через решетку в виде перфорированного листа – резкое сужение. Перфорированный лист с отверстиями 10x10 мм шагом 20 мм 160x30 шт. (см. рис. 16).

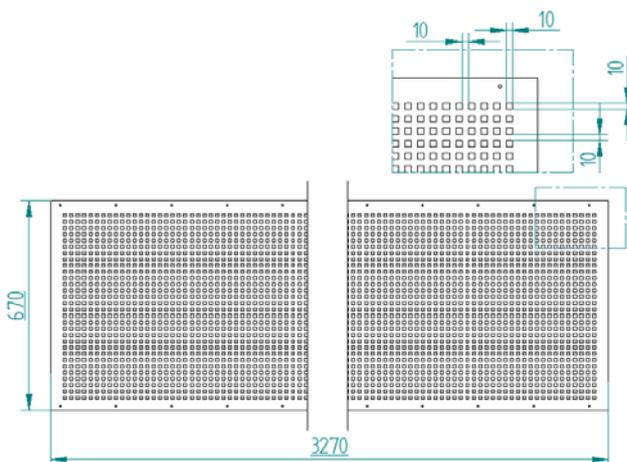


Рис. 16. Перфорированный лист.

$$\text{Живое сечение решетки: } F_{K2}=160 \cdot 30 \cdot 0,01 \cdot 0,01=0,48 \text{ м}^2. \quad (96)$$

$$\text{Площадь решетки: } F_{K2}=3,27 \cdot 0,67=2,19 \text{ м}^2. \quad (97)$$

Согласно методике [8] коэффициент местного гидравлического сопротивления

$$\zeta = f(\bar{f}), \zeta_{K2} = 50 \text{ (см. рис. 17).}$$

$$\bar{f} = \frac{F_{K2}}{A_{K2}} = \frac{0,48}{2,19} = 0,219 \quad (98)$$

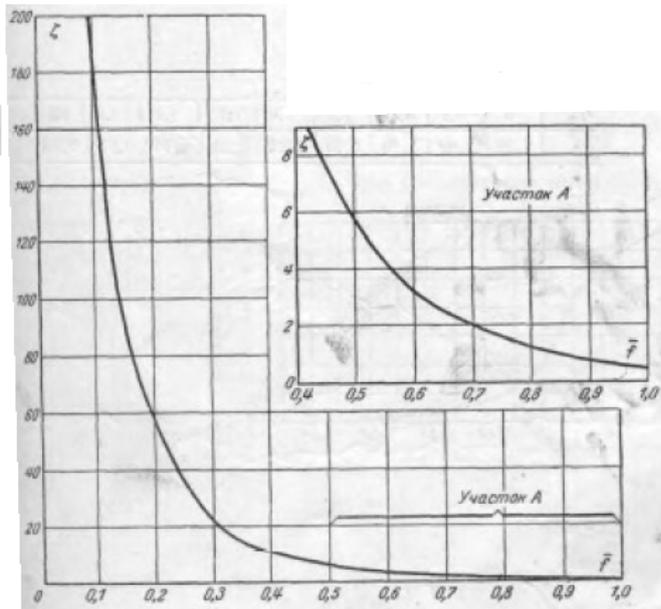


Рис. 17. Коэффициент местного гидравлического сопротивления решетки [8].

$$P_{KK2} = \zeta_{K2} \cdot \frac{v_{K2}^2}{2} \cdot \rho = 50 \cdot \frac{0,899^2}{2} \cdot 0,7634 = 15,43 \text{ Па} \quad (99)$$

Потери давления  $P_{K2}$  при преодолении гидравлических сопротивлений в канале притока воздуха „K2“, Па:

$$P_{K2} = P_{IK2} + P_{KK2} = 0,0013 + 15,43 = 15,43 \text{ Па} . \quad (100)$$

#### 4.6. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в пустой зоне камеры до и после заготовок

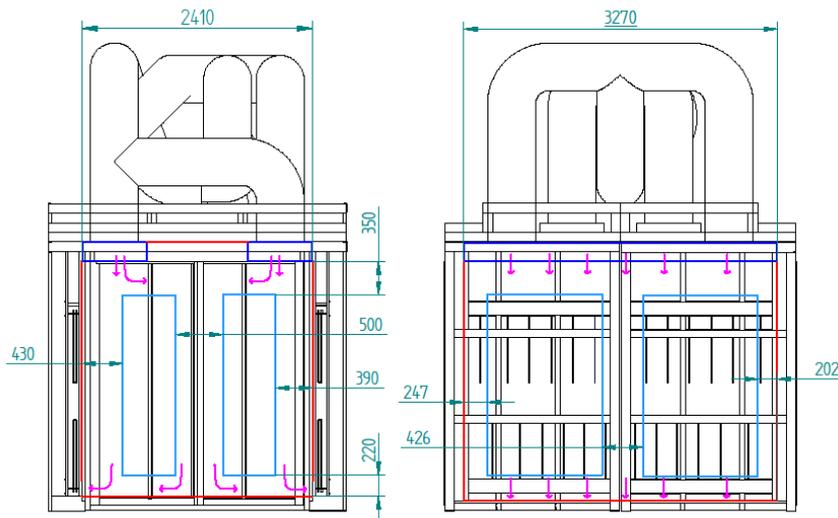


Рис. 18. Размеры канала потока воздуха в пустой зоне камеры до и после заготовок.

Зная площадь поперечного сечения потока воздуха в пустой зоне камеры до и после заготовок и расход воздуха в поперечном сечении канала  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18), можно вычислить скорость потока в канале.

$$v_{TU} = \frac{Q}{A_{TU}} = \frac{Q}{a_{TU} \cdot b_{TU}} = \frac{1,968}{2,41 \cdot 3,270} = 0,25 \text{ м/с} \quad (101)$$

где  $v_{TU}$  – скорость потока в канале в пустой зоне камеры до и после заготовок, м/с;

$a_{TU}$  – ширина пустой зоны камеры до и после заготовок 2,41 м (см. рис. 18);

$b_{TU}$  – глубина пустой зоны камеры до и после заготовок 3,27 м (см. рис. 18).

$$D_{gTU} = \frac{4 \cdot A_{TU}}{Z_{TU}} = \frac{4 \cdot 8,352}{11,76} = 2,84 \text{ м} \quad (102)$$

$$\text{Re} = \frac{v_{TU} \cdot D_{gTU}}{\nu_{190}} = \frac{0,24 \cdot 2,84}{33,67 \cdot 10^{-6}} = 21087 > 4500 \quad (103)$$

где  $\nu_{190}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при максимальной температуре рабочей среды  $190^\circ\text{C}$  [5];

$D_{gTU}$  – гидравлический диаметр канала потока воздуха в пустой зоне камеры до и после заготовок, м;

$A_{TU}$  – площадь поперечного сечения потока воздуха в канале потока воздуха в пустой зоне камеры до и после заготовок, м<sup>2</sup>;

$z_{TU}$  – смоченный периметр поперечного сечения потока в канале потока воздуха в пустой зоне камеры до и после заготовок, м ;

$v_{TU}$  – скорость потока в канале потока воздуха в пустой зоне камеры до и после заготовок, м/с (см. формулу 101).

Так как число Рейнольдса больше 4500, значит движение воздуха в каналах притока турбулентное. Зона гидравлически гладких труб. Трубы оцинкованные стальные и абсолютная шероховатость  $\Delta_e = 0,15$  мм [7].

$$4000 < Re < 10 \cdot \frac{D_{gTU}}{\Delta_e}; \quad 4000 < 21087 < 10 \cdot \frac{2840}{0,15}; \quad 4000 < 21087 < 189333. \quad (104)$$

Безразмерный коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda_{TU} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{21087}} = 0,0263 \quad (105)$$

Линейные потери в пустой зоне камеры прямоугольного сечения (см. стр. 29).

$$P_{lTU} = \lambda_{TU} \cdot \frac{L_{TU}}{D_{gTU}} \cdot \frac{v_{TU}^2}{2} \cdot \rho = 0,0263 \cdot \frac{0,57}{2,84} \cdot \frac{0,24^2}{2} \cdot 0,7634 = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \quad (106)$$

Местные потери в пустой зоне камеры (см. стр. 30).

Коэффициент местного гидравлического сопротивления при переходе воздуха в рабочую зону камеры - резкое сужение:

$$\zeta_{TU1} = 0,5 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_{gTO}}{D_{gTU}} \right)^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,877}{2,94} \right)^2 \right] = 0,451 \quad (107)$$

$$P_{ktU1} = \zeta_{TU1} \cdot \frac{v_{TU}^2}{2} \cdot \rho = 0,451 \cdot \frac{0,24^2}{2} \cdot 0,7634 = 9,92 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (108)$$

Местные потери в пустой зоне камеры при переходе в канал нагрева воздуха - резкое сужение (см. стр. 30).

Коэффициент местного гидравлического сопротивления при переходе в канал нагрева воздуха:

$$\zeta_{TU2} = 0,5 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{D_g}{D_{gTU}} \right)^2 \right] = 0,5 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{0,287}{2,94} \right)^2 \right] = 0,495 \quad (109)$$

$$P_{kTU2} = \zeta_{TU2} \cdot \frac{v_{TU}^2}{2} \cdot \rho = 0,495 \cdot \frac{0,24^2}{2} \cdot 0,7634 = 0,011 \text{ Па}$$

(110)

Потери давления  $P_{TU}$  при преодолении гидравлических сопротивлений в канале пустой зоны камеры до и после заготовок, Па:

$$P_{TU} = P_{ITU} + P_{kTU1} + P_{kTU2} = 1,16 \cdot 10^{-4} + 9,92 \cdot 10^{-3} + 0,011 = 0,021 \text{ Па} .$$

(111)

#### 4.7. Потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений в рабочей зоне камеры

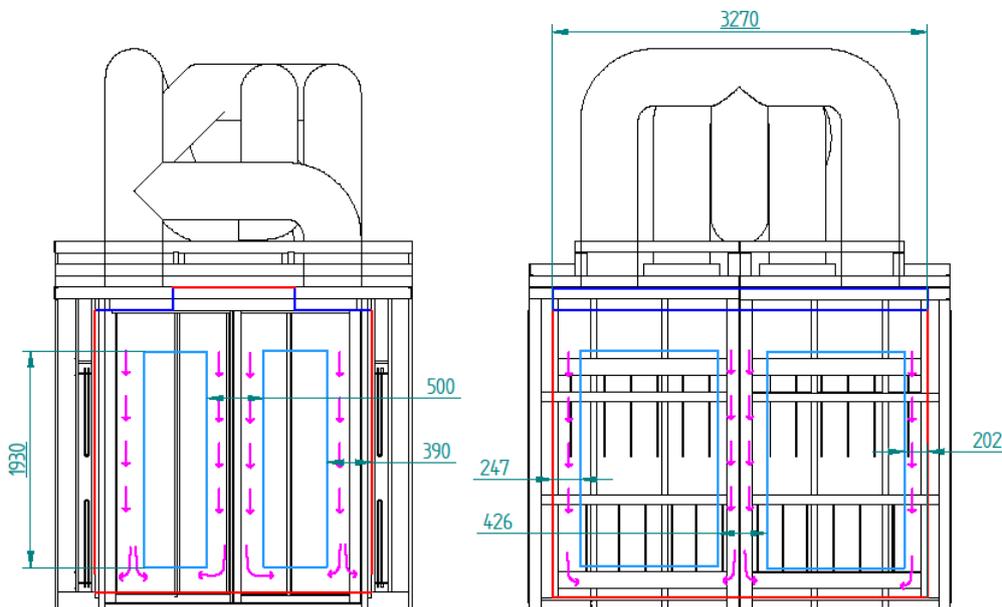


Рис. 19. Размеры канала потока воздуха в рабочей зоне камеры.

Зная площадь поперечного сечения потока воздуха в рабочей зоне камеры и расход воздуха в поперечном сечении канала  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18), можно вычислить скорость потока в канале.

$$v_{TO} = \frac{Q}{A} = \frac{1,968}{5,712} = 0,34 \text{ м/с}$$

(112)

$$D_{gTO} = \frac{4 \cdot A}{z} = \frac{4 \cdot 5,712}{25,76} = 0,887 \text{ м}$$

(113)

$$Re = \frac{v_{TO} \cdot D_{gTO}}{\nu_{190}} = \frac{0,34 \cdot 0,887}{33,67 \cdot 10^{-6}} = 8956 > 4500$$

(114)

где  $\nu_{190}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха при максимальной температуре рабочей среды 190°C [5];

$D_{gTO}$  – гидравлический диаметр канала потока воздуха в рабочей зоне камеры, м;  
 $A_{TO}$  – площадь поперечного сечения потока воздуха в канале потока воздуха в рабочей зоне камеры определенная с помощью программного обеспечения Solid Edge с учетом, что в камере находится 4 заготовки максимальных размеров, м<sup>2</sup> (см. стр. 15);

$z_{TO}$  – смоченный периметр поперечного сечения потока в канале потока воздуха в рабочей зоне камеры определенный с помощью программного обеспечения Solid Edge с учетом, что в камере находится 4 заготовки максимальных размеров, м (см. стр. 15);

$\nu_{TO}$  – скорость потока в канале потока воздуха в пустой зоне камеры до и после заготовок, м/с (см. формулу 112).

Так как число Рейнольдса больше 4500, значит движение воздуха в каналах притока турбулентное. Зона гидравлически гладких труб. Трубы оцинкованные стальные и абсолютная шероховатость  $\Delta_e = 0,15$  мм [7].

$$4000 < Re < 10 \cdot \frac{D_{gTO}}{\Delta_e}; \quad 4000 < 8956 < 10 \cdot \frac{887}{0,15}; \quad 4000 < 8956 < 59133. \quad (115)$$

Безразмерный коэффициент сопротивления трения определяется по формуле Блазиуса:

$$\lambda_{TO} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{Re}} = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{8956}} = 0,0325 \quad (116)$$

Линейные потери в рабочей зоне камеры прямоугольного сечения (см. стр. 31).

$$P_{lTO} = \lambda_{TO} \cdot \frac{L_{TO}}{D_{gTO}} \cdot \frac{\nu_{TO}^2}{2} \cdot \rho = 0,0325 \cdot \frac{1,93}{0,887} \cdot \frac{0,34^2}{2} \cdot 0,7634 = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \quad (117)$$

Местные потери (см. стр. 32) в рабочей зоне камеры при переходе воздуха в пустую зону камеры - резкое расширение.

Коэффициент местного гидравлического сопротивления:

$$\zeta_{TO} = \left[ 1 - \left( \frac{D_{gTU}}{D_{gTO}} \right)^2 \right]^2 = \left[ 1 - \left( \frac{0,887}{2,84} \right)^2 \right]^2 = 0,814 \quad (118)$$

$$P_{kTO} = \zeta_{TO} \cdot \frac{\nu_{TO}^2}{2} \cdot \rho = 0,814 \cdot \frac{0,34^2}{2} \cdot 0,7634 = 0,036 \text{ Па} \quad (119)$$

Потери давления  $P_{TO}$  при преодолении гидравлических сопротивлений в канале рабочей зоны камеры до и после заготовок, Па:

$$P_{TO} = p_{ITO} + p_{kTO} = 3,12 \cdot 10^{-3} + 0,036 = 0,039 \text{ Па} . \quad (120)$$

#### **4.8. Суммарные потери давления потока воздуха при преодолении гидравлических сопротивлений при циркуляции в камере**

Суммарные потери давления воздуха на преодоление гидравлических сопротивлений при циркуляции воздуха в камере  $P_{SUM}$ :

$$\begin{aligned} P_{SUM} &= 2 \cdot P + 2 \cdot P_{K1} + P_T + 2 \cdot P_{K2} + P_{TU} + P_{TO} = \\ &= 2 \cdot 11,51 + 2 \cdot 132,5 + 468,02 + 2 \cdot 15,43 + 0,021 + 0,039 = 786,96 \text{ Па} . \end{aligned} \quad (121)$$

Выбор вентилятора подробно описывается в главе 5.2. (см. стр. 49).

## 5. ОБОРУДОВАНИЕ КАМЕРЫ ПОЛИМЕРИЗАЦИИ

### 5.1. Трубчатый электронагреватель

ТЭН – это аббревиатура – производная от названия «трубчатый электронагреватель». ТЭН применяется для получения тепловой энергии по средствам преобразования её из электрической.

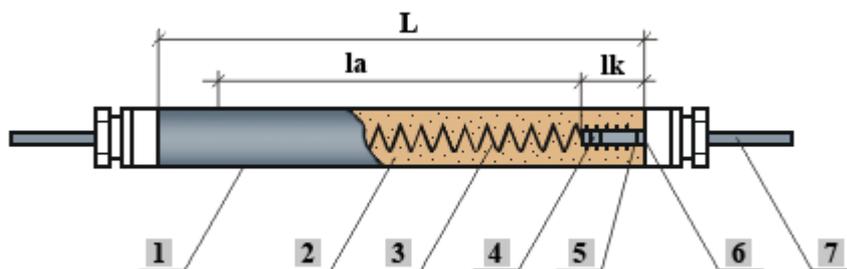


Рис. 8. Конструкция ТЭН.

- 1 - металлический корпус
- 2 - наполнитель
- 3 - спираль
- 4 - контактный стержень в заделке
- 5 - герметик
- 6 - изолятор
- 7 - контактный стержень

$L$  - развернутая длина

$l_a$  - активная длина

$l_k$  - длина контактного стержня в заделке.

ТЭНы используют для нагрева любых средств от воды и воздуха до масла и различных взрывоопасных сред.

Тип S – спокойный воздух, газы – данные ТЭНы используются для нагрева неподвижного воздуха, либо подвижного, если скорость потока менее 6 м/сек [6]. Данная скорость потока подходит по проекту (см. стр. 9). Эти ТЭНы изготовлены из углеродистой стали. Температура на оболочке – 450°C.

Тип Т - спокойный воздух, газы – данные ТЭНы аналогичны ТЭНам типа S, но они могут быть изготовлены на большую мощность, так как производятся из нержавеющей жаропрочной стали. Температура на оболочке – от 450°C до 600°C.

Одной из важнейших характеристик трубчатого электронагревателя является длина трубки без изоляторов и шпилек, именно от этого значения в большей степени зависит на какую максимальную мощность можно изготовить ТЭН.

Таблица 4.1.1. Спокойный воздух – среда, тип S – углеродистая сталь.

Длина, см	32	45	60	78	85	100	120	140	170	200	240	280
Мощность, кВт	0,25	0,32	0,4	0,63	0,63	0,8	1,0	1,0	1,25	1,6	2,0	2,0

Таблица 4.1.2. Спокойный воздух – среда, тип Г – нержавеющая сталь.

Длина, см	32	45	60	78	85	100	120	140	170	200	240	280
Мощность, кВт	0,63	0,63	1,0	1,25	1,6	1,6	2,0	2,5	3,15	3,5	4,0	5,0

Выбираем ТЭН типа Г, длиной 78 см, мощностью 1,25 кВт (см. табл. 4.1.2) т.к. они меньшей длиной и это позволит расположить ТЭНы согласно проекту (см. стр. 10). Стандартные ТЭНы изготавливаются на 220 или 380 Вольт. ТЭН имеет стандартную форму (см. рис. 8).



Рис. 8. Форма ТЭН.

$$Q_{AL} = Q_V$$

$$1,25 \cdot 48 > 52,7 \text{ кВт} , \tag{40}$$

$$60 > 52,7 \text{ кВт}$$

где  $Q_V$  – количество теплоты вырабатываемое ТЭНами.

Уравнение показывает, что количество теплоты вырабатываемое ТЭНами больше на 13,9%, чем количество теплоты необходимое для существования теплового баланса. При необходимости мощность камеры позволяет более быстро нагревать камеру до температуры рабочего режима 190°C (см. стр. 9), а так же позволяет производить

покраску изделий, отличающихся от условленных изделий, требующих больше тепла для нагрева до температуры полимеризации краски (большей массы и другие металлы).

## 5.2. Выбор центробежного вентилятора

По рисунку технических характеристик центробежных вентиляторов производимых фирмой Soler&Palau (см. рис. 12) видно, что для заданного расхода воздуха в каналах камеры  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  (см. стр. 18) и для преодаления сопротивлений при циркуляции воздуха в камере  $P_{SUM}=786,96 \text{ Па}$  (см. формулу. 121) подходит модель /4-355. Но выбираем модель /4-400 которая при расходе воздуха в каналах камеры  $Q=1,968 \text{ м}^3/\text{с}$  позволяет преодалевать статическое давление в камере до 1400 Па при двигателе мощностью 4 кВт, эта модель позволяет производить покраску изделий, отличающихся от условленных изделий, при которых потери давления на преодоление гидравлических сопротивлений в канале рабочей зоны камеры будут больше.

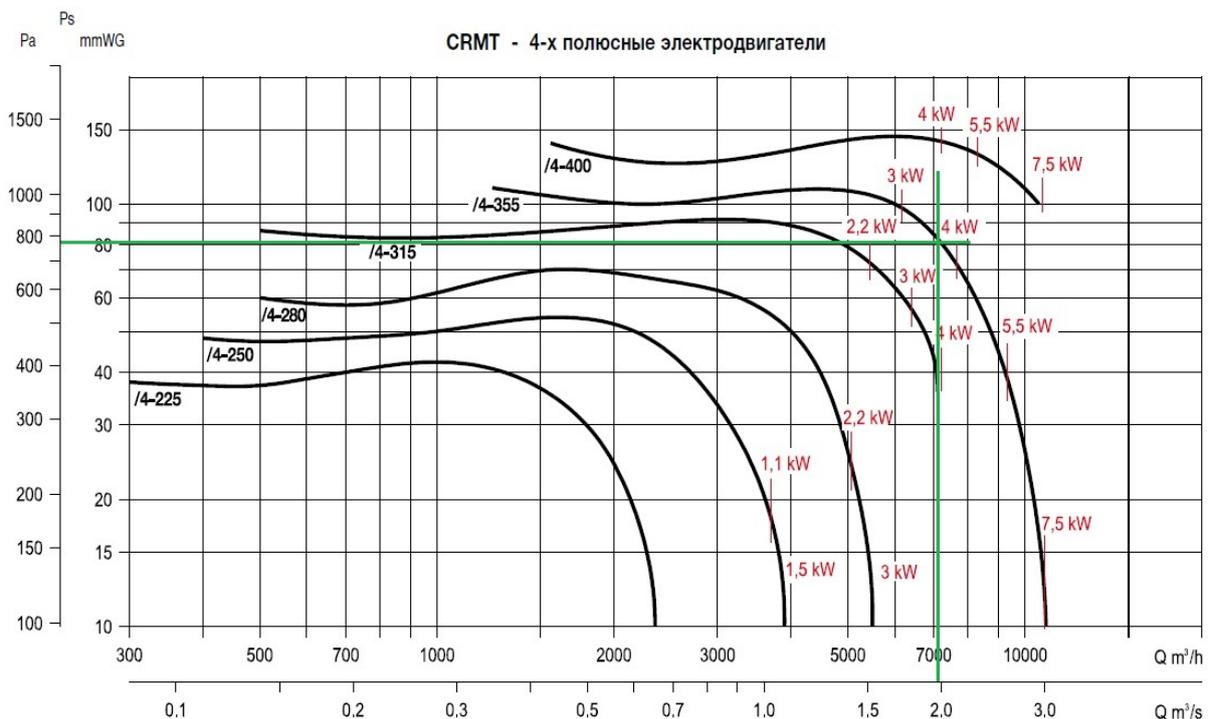


Рис. 12. Технические характеристики центробежных вентиляторов фирмы Soler&Palau.

где  $Q$  – расход воздуха в  $\text{м}^3/\text{с}$  и  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

$P_s$  – статическое давление в Па и мм вод. ст..

Данные приведены: в соответствии со стандартами: ISO 5801 и AMCA 210-99.

при температуре сухого воздуха 20°C и атмосферном давлении 760 мм рт. ст.

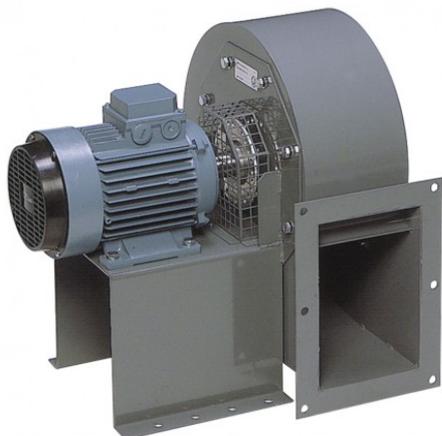


Рис. 13. Центробежный вентилятор CRMT/4-400/165 4 кВт фирмы Soler&Palau.

Центробежный вентилятор одностороннего всасывания с прямым приводом Soler&Palau CRMT/4-400/165 4 кВт (400 В 50 Гц) LG (см. рис. 13) предназначен для продолжительной работы при температуре перемещаемого воздуха до 300°C. Также, возможно использование вентиляторов в системах дымоудаления с пределом огнестойкости 400°C / 2 часа.

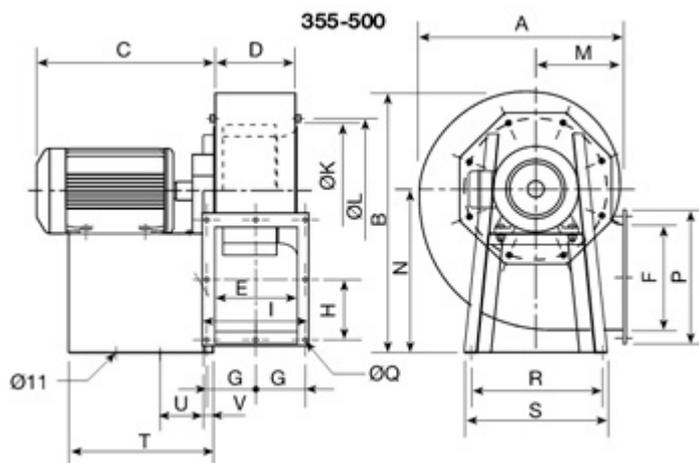
Корпус вентилятора сварной, изготавливается из листовой стали и защищен от коррозии эпоксидно-полиэфирной краской. Вентилятор комплектуется рабочими колесами с загнутыми вперед лопатками из оцинкованной стали. Рабочее колесо с загнутыми вперед лопатками динамически сбалансировано в соответствии с требованиями ISO 1940 (см. рис. 14).



Рис. 14. Рабочее колесо центробежного вентилятора.

Класс защиты ,электродвигателя: IP55, класс изоляции F. Электропитание трехфазное 4-х полюсное (3ф - 400 В, 50 Гц). Максимальная потребляемая мощность 4 кВт, максимальный расход воздуха 7200 м<sup>3</sup>/ч, частота вращения 1420 об/мин, масса 73,5 кг. Специальная система охлаждения исключает перегрев электродвигателя.

Применение: автостоянки, производственные кухни, сушильные камеры, продолжительная работа, литейное производство, охлаждение различных механизмов, сварочные работы, вентиляция и охлаждение рабочих мест, технологическое оборудование, системы дымоудаления.



$A=628$ ,  $B=792$ ,  $C=555$ ,  $D=254$ ,  $E=249$ ,  $F=320$ ,  $G=150$ ,  $H=185$ ,  $I=334$ ,  $K=410$ ,  $L=438$ ,  
 $M=270$ ,  $N=495$ ,  $P=404$ ,  $Q=11$ ,  $R=402$ ,  $S=438$ ,  $T=420$ ,  $V=30$ ,  $U=2 \times 13$ .

Рис. 15. Габаритные размеры центробежный вентилятор Soler&Palau CRMT/4-400/165 4KW, мм.

### 5.3. Пульт управления камерой полимеризации

Пульт управления камерой полимеризации в комплексе с термоэлектрическими датчиками позволяет автоматически управлять процессом полимеризации порошковой краски. Пульт управления может быть установлен непосредственно на камере полимеризации или рядом с ней на стене.

### 5.4. Частотный преобразователь

Два основных недостатка асинхронного двигателя – это невозможность простой регулировки скорости вращения ротора, очень большой пусковой ток - в пять, семь раз превышающий номинальный. Если использовать только механические устройства регулирования, то указанные недостатки приводят к большим энергетическим потерям и к ударным механическим нагрузкам. Это крайне отрицательно сказывается на сроке службы оборудования.

Частотный преобразователь с широтно–импульсным управлением (ЧП с ШИМ) снижает пусковые токи в 4-5 раз. Он обеспечивает плавный пуск асинхронного двигателя и осуществляет управление приводом по заданной формуле соотношения напряжение / частота.

Частотный преобразователь дает экономию по потреблению энергии до 50%. Появляется возможность включения обратных связей между смежными приводами, т.е. самонастройки оборудования под поставленную задачу и изменение условий работы всей системы.

Частотный преобразователь с ШИМ представляет собой инвертор с двойным преобразованием напряжения. Сетевое напряжение 380 В выпрямляется входным диодным мостом, затем сглаживается и фильтруется с помощью конденсаторов.

Это первый этап преобразования. На втором этапе из постоянного напряжения, с помощью микросхем управления и выходных мостовых IGBT ключей, формируется ШИМ последовательность определенной частоты и скважности. На выходе частотного преобразователя выдаются пакеты прямоугольных импульсов, но за счет индуктивности обмоток статора асинхронного двигателя, они интегрируются и превращаются наконец в напряжение близкое к синусоиде.

#### **5.4.1. Выбор частотных преобразователя**

##### По способу управления.

Большинство современных частотных преобразователей реализуют векторное управление, но такие частотные преобразователи дороже, чем частотные преобразователи со скалярным управлением.

Векторное управление дает возможность более точного управления, снижая статическую ошибку. Скалярный режим только поддерживает постоянное соотношение между выходным напряжением и выходной частотой, но например, для вентиляторов это вполне достаточно.

##### По перегрузочным способностям.

В первом приближении, мощность частотного преобразователя нужно выбирать на 10-15% больше мощности двигателя. Максимальная потребляемая мощность вентилятора 4 кВт (см. стр. 50). Ближайший больший по мощности частотный преобразователь 5,5 кВт. Ток преобразователя должен быть больше номинального тока двигателя и чуть больше тока возможных перегрузок.

По диапазону регулировки частоты.

Верхней предел регулировки частоты важен при использовании двигателей с высокими номинальными рабочими частотами. Диапазон частот 50 Гц соответствует потребностям. Нижний предел определяет диапазон регулирования скорости привода. Стандарт – это 1:10. Более широкий диапазон не нужен, поэтому скалярное управление для выбранного вентилятора вполне достаточно.

По количеству входов управления.

Дискретные входы нужны для ввода команд управления (пуск, стоп, реверс, торможение и т.д.). Аналоговые входы необходимы для ввода сигналов обратной связи (регулировки и настройки привода в процессе работы).

По количеству выходных сигналов.

Дискретные выходы используются для выхода сигналов о различных событиях (авария, перегрев, входное напряжение выше или ниже уровня, сигнал ошибки ит.д.). Аналоговые выходы используются для построения сложных систем с обратными связями.

Выбираем частотный преобразователь модель ABB ASC310 5.5кВт 3-ф/380 (см. рис. 16).



Рис. 15. Преобразователь частоты ASC310 5.5кВт 3-ф/380 ( ACS310-03E-13A8-4 ).

Таблица 4.1.7.1. Технические характеристики преобразователя частоты ASC310 [10].

Бренд	ABB
Серия	ACS310
sku	ACS310-03E-13A8-4
Мощность	5,5 кВт
Число фаз/напряжение на входе	3-ф/380 (трехфазный 380в) В

Число фаз/напряжение на выходе	3-ф/380 В
Mmax (1 мин) %	110-130
Ток номинальный	12,50 А
Ток в течении 1 минуты	13,8 А
Ток максимальный в течении 2 с	21,9 А
Максимальная выходная частота	500 Гц
Вес изделия	2,5 кг
Степень защиты по IP	20
EMC фильтр	есть
Высота	236 мм
Ширина	169 мм
Глубина	169 мм
Тормозной модуль	нет
Встроенный ПЛК	нет
Встроенный регулятор	ПИД
Скалярный режим управления	есть
Векторный режим управления без энкодера	нет
Векторный режим управления с энкодером	нет
Линейный закон управления U/f	есть
Квадратичный закон управления U/f <sup>2</sup>	есть
Панель программирования в комплекте с ПЧ	нет
Базовая панель программирования	ACS-CP-C
Расширенная панель программирования	ACS-CP-A
Программатор	MFDT-01
Максимальное число фиксированных скоростей	4
Число/тип аналоговых входов	2 (1: 0-10В или -10...+10В; 1: 0(4)-20мкА или -20...+20мкА)
Число дискретных входов	5
Число/тип аналоговых выходов	1: 0(4)...20мкА

Число дискретных(транзисторных) выходов	1
Число релейных выходов	1
Встроенный потенциометр (или номинал сопротивления)	нет
Протокол Ethernet IP	SREA-01
Интерфейс RS-485/Modbus	есть
Применение	Насосы, вентиляторы

## 5.5. Системы автоматки

Автоматика регулирования температуры в камере полимеризации настроена таким образом, что при достижении заданной температуры внутреннего объема отключается по одной группе ТЭНов с каждой стороны, количество теплоты вырабатываемое всеми ТЭНами падает на 25%. При достижении температуры внутреннего объема на 10°С ниже заданной включается заново.

### 5.5.1. Контроль температуры воздуха в камере полимеризации

У термопары типа К кратковременный диапазон измерения -180...+1300°С, длительны 0...+1100°С. Тип К особенно подходит для измерения высоких температур до +400°С в газообразных средах и имеет очень короткое время реакции менее 5 с.

Для контроля температуры в рабочей зоне камеры установлено две термопары проводниковые термопары типа К модель ТРК/Е 1,5 м [11]. Тип К NiCr-NiAl Никель–хром/никель–алюминий (хромель/алюмель) безпотенциальный. Класс точности 1 ( $\pm 1.5$  от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $375^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 0.004 \times T$  от  $375^{\circ}\text{C}$  до  $1000^{\circ}\text{C}$ ). Диаметр кабеля 1,2 мм. Благодаря установленному на конце кабеля стандартному ТЕ мини-штекеру, термопара без проблем подключается к измерительным приборам большинства производителей измерительной техники (см. рис. 16). Удлинительный кабель изготовлен из стекловолокна, гибкий, длина 1,5м.



Рис. 16. Проводниковая термопара ТРК/Е.

### 5.5.2. Регулирование температуры воздуха в камере полимеризации

Для контроля температуры используем щитовой цифровой измеритель-регулятор постоянного тока и температуры Ф0303.3 (см. рис. 17). Измеритель-регулятор двухканальный, программируемый, предназначен для измерения и регулирования входных величин в виде сигналов постоянного тока, напряжения или температуры с помощью внешних термопреобразователей сопротивления и преобразователей термоэлектрических, а также преобразования «вход-выход» измеряемых входных величин по одному назначенному каналу измерения (входу) в непрерывный выходной унифицированный аналоговый.



Рис. 17. Измеритель-регулятор постоянного тока и температуры Ф0303.3.

С применением датчиков и измерительных преобразователей, измеритель регулятор предназначен для измерения и регулирования других величин, таких как: давление, мощность, частота, влажность, уровень и т.д.

При использовании с измерителем-регулятором Ф0303.3 адаптера - регистратора АД4 возможно вести регистрацию всех измерений [12].

Коммутирующее устройство измерителя-регулятора Ф0303.3 состоит из трех переключающих электромагнитных реле, каждое из которых программно назначается на любой из каналов измерения.

Программирование измерителя-регулятора Ф0303 осуществляется как при помощи кнопок управления, расположенных на передней панели прибора, так и программно по интерфейсу RS485.

### Технические характеристики измерителя-регулятора постоянного тока и температуры Ф0303.3.

Количество каналов измерения Ф0303.3: 2;

Изменяемые величины: I, U, t;

Диапазоны измерений:

- для амперметров 0,1мА — 1А;

- для вольтметров 100мВ — 250В, 400В;

- для измерителей температуры от -200°С до +1600°С;

- для подключения датчиков и измерительных преобразователей - 4-20 мА, 0-5 мА, 0-20 мА, 0-10В;

Класс точности:

0,2 - горизонтальное исполнение;

0,5 – при использовании термодпар, датчиков, преобразователей;

Интерфейс: RS 485 (MODBUS RTU);

Программное обеспечение:

- "DESS@ — регистрация значений на ПК, отображение параметров и состояний реле, сигнала, управление приборами (простейшая SCADA Yurimov),

- "complex systems modbus opc server, configOPC" — подключение к коммерческим SCADA через OPC протокол;

Питание, В: ~(110-242), =(140-340);

Условия эксплуатации: -20°С...+40°С;

Габаритные размеры, мм: 144x72x117

Для контроля и регулирования температуры используем универсальный ПИД - регулятор температуры ARCOM-D99-160 (см. рис. 18). В диапазоне 200...1300°С предназначен для измерения и контроля следующих видов сигналов от объекта контроля: сигналов от термопреобразователей сопротивления,

термоэлектрических преобразователей (термопар), сигналов постоянного тока и напряжения [13].

ПИД -регулятор температуры может использоваться в различных системах измерения и контроля параметров технологических процессов, сбора, визуализации, обработки и оценки данных измерений, сигнализации об их состоянии относительно заданных значений. Обеспечивает различные способы управления объектом: позиционный (ON/OFF) и ПИД (с функцией автонастройки). Также имеется возможность выбора различных режимов работы дополнительных сигнальных реле. Выполнен в пластиковом корпусе и может устанавливаться в щитах и пультах управления под любым углом к горизонту. Внутри корпуса установлены печатные платы, на которых смонтированы элементы электрической схемы. На задней стороне корпуса расположены клеммные соединители, посредством которых осуществляются все коммутации. Обеспечивает цифровую индикацию измеряемой величины, с плавающей десятичной точкой.

Настройка прибора осуществляется посредством кнопок управления с лицевой панели.



Рис. 18. Универсальный ПИД -регулятор температуры ARCOM-D99-160.

Таблица 4.4.2.1. Технические характеристики универсального ПИД -регулятора температуры ARCOM-D99-160.

Параметры	Значение
Универсальный переключаемый входной сигнал.	<u>термопары К, L, R, S, B, E, N, T</u> , <u>термосопротивления РТ100</u> , 50М, а также 0...20 мА, 4...20 мА, 0...5 В, 1...5 В.
Класс точности.	5% или $\pm 1$ ед. младшего разряда индикатора
Регулирование.	ПИД (с автонастройкой) и On/Off
Питание.	~100...240 А
Выходные каналы.	1(2) реле ~250 В, 5 А; ~125В, 6А; при $\cos \alpha = 1$

Сигнализационные реле (не основные).	2 реле ~250 А, 5 А; ~125 А, 6 А; при $\cos \alpha = 1$
Два дополнительных реле.	5 А; 250 А
Температура окружающей среды.	5...50 °С
Влажность окружающей среды.	45...85%
Размеры лицевой панели.	96x96 мм
Интерфейс.	RS-485

### **5.5.3. Система вентиляции воздуха в зоне нанесения порошковой краски и в зоне остывания изделия**

Благоприятная санитарная обстановка на рабочем месте обеспечивается наличием системы вентиляции воздуха в зоне нанесения порошковой краски и в зоне остывания изделия (см. рис. 19). Система удаляет остаточные вредные вещества, выделяющиеся при полимеризации порошковой краски в течение всего рабочего цикла и выходящие в большем количестве из камеры при открывании дверей. При открывании дверей срабатывает датчик, включая вентилятор, который работает в течение времени необходимого для удаления газов. Для выбора вентилятора рассчитывается расход воздуха и статическое давление по системе вентиляции завода, учитывая все линейные и местные сопротивления потока воздуха. Период времени работы и объем расхода воздуха при вытяжки рассчитывается основываясь на то, что вентиляционные системы технологического оборудования должны соответствовать требованиям безопасности. Блокировка вентиляционных систем должна обеспечивать до начала и после окончания процесса распыления не менее чем двукратный обмен воздуха по отношению к объему камер.

Производительность вентилятора должна обеспечивать в технологическом оборудовании и воздуховодах вытяжной вентиляции концентрацию аэрозвеси порошкового материала менее половины его нижнего концентрационного предела воспламенения. Средняя скорость воздушного потока в воздуховодах систем вытяжной вентиляции должна быть не менее 8 м/с [14].

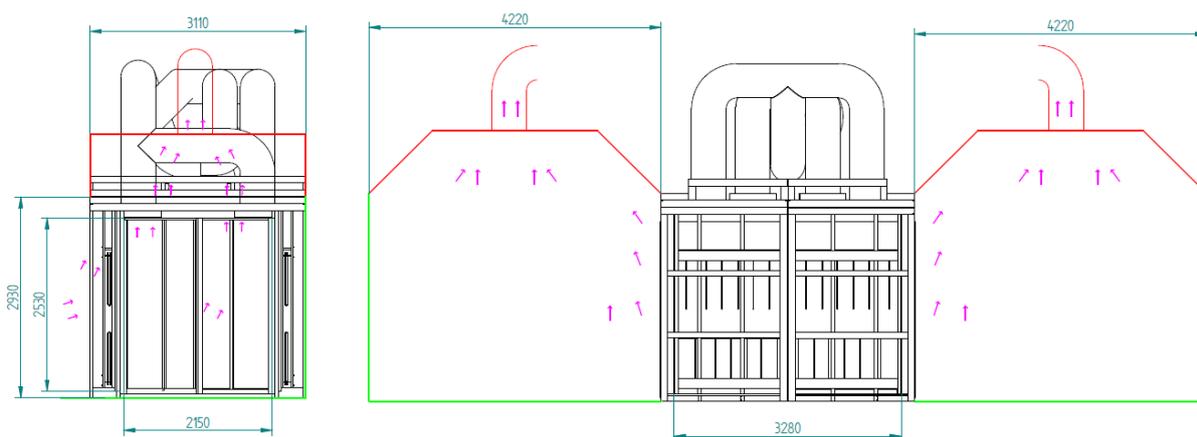


Рис. 19. Система вентиляции в зоне остывания изделия.

#### 5.5.4. Микропроцессорное реле

Время работы вентилятора вентиляции в зоне остывания изделия регулируется с помощью реле. Микропроцессорное реле СТ-АНД.22 (см. рис. 20) - реле задержки на выключение, на катушку реле должно постоянно подаваться напряжение питания. При подаче на управляющий вход напряжения реле срабатывает и светодиод постоянно горит. Снимая напряжение с управляющего входа, начинается отсчет времени на отключение и светодиод начинает мигать. По истечении времени задержки контакты реле отключаются. Если во время отсчета задержки на управляющий вход вновь подать напряжение, отсчет времени стирается и начнется заново при отключении напряжения на управляющем входе.



Рис. 20. Реле времени СТ-АНД.22

Сфера применения: Микропроцессорное реле времени СТ-АНД.22 предназначено для выключения нагрузки в системах бытовой и промышленной автоматики (вентиляционных, отопительных, осветительных и т.п.) после отсчета заданного

отрезка времени [10]. Реле времени СТ-АНД.22 модульное (задержка на выключение)  
24-48В DC, 24- 240В AC (7 временных диапазонов 0,05с...100ч) 2ПК.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной выпускной работе выполнен проект новой печи полимеризации порошковой краски для производственного здания завода Falconet Metall. Проект состоит из следующих этапов: выбор материалов и размеров каркаса печи; выбор теплоизоляционных материалов ограждений печи; тепловой расчет печи и выбор мощности трубчатых электрических нагревателей ТЭН; аэродинамический расчет печи и выбор вентилятора; выбор автоматики и вспомогательного оборудования.

Согласно выполненному проекту, на заводе OÜ Falconet Metall была изготовлена печь, которая успешно эксплуатируется с августа 2013 года.

Каркас корпуса камеры полимеризации выполнен из U образных стальных швеллеров SFS5484 30/100/30x3 толщиной 3 мм и трубы 50x25x2 толщиной 2 мм. Стены камеры выполнены из оцинкованного листа DC01 толщиной 1 мм. В качестве изоляционного материала выбраны материалы PAROC и ROCKWOOL.

На основе результатов теплового расчета печи были выбраны ТЭНы суммарной мощностью 60 кВт. Для осуществления вентиляции воздуха в камере печи по результатам аэродинамического расчета был выбран центробежный вентилятор CRMT/4-400/165 фирмы Soler&Palau. В работе также представлено описание выбранного вспомогательного оборудования и оборудования автоматики.

В 2014 году, на основе данного проекта, планируется строительство новой печи полимеризации порошковой краски для производственного здания завода производителя металлических дверей ООО "ЭСТРУДООР" в Ивангороде (Россия).

## KOKKUVÕTE

Antud lõputöös projekteeriti uus pulbervärvi polimerisatsiooniahi tehase Falkonet Metall tootmishoonele. Projekt koosneb järgmistest osadest: ahju karkassi mõõtude ja materjali valik; ahju välispinna soojusisolatsiooni valik; ahju soojusarvutus ja torukujuliste elektriliste küttekehade võimsuse määramine; ahju aerodünaamiline arvutus ja ventilaatori valik; automaatika ja abiseadmete valik.

Selle projekti järgi ehitati tehases OÜ Falkonet Metall ahi, mis on edukalt käigus alates 2013. a. augustist.

Polimerisatsioonikambri korpuse karkass on valmistatud terasprofiilidest U-profiilist SFS5484 30/100/30x3 seinapaksusega 3 mm ja 50x25x2 teras torust seinapaksusega 2 mm. Kambri seinad on valmistatud 1 millimeetrisest tsingitud plekist DC01. Isolatsiooniks valiti PAROC ja ROCKWOOL.

Soojusarvutuse põhjal valiti elektriliste küttekehade koguvõimsuseks 60 kW. Kambri ventileerimiseks valiti aerodünaamilise arvutuse põhjal firma Soler&Palau tsentrifugaalventilaator CRMT/4-400/165. Töös kirjeldatakse samuti valitud abiseadmeid ja automaatikat.

2014. aastal kavatakse ehitada selle projekti järgi uus pulbervärvi polimerisatsiooniahi Venemaal, Ivangorodi metallustetehasele „ESTRODOOR“.

## SUMMARY

The project of powder coating oven has been carried out in the present final work. The project has been performed for Falconet Metall Company. The project consists of the following stages: selection of the material and dimensions for the frame of the oven; selection of the material for the thermal insulation; thermal calculation and capacity selection for electrical heating elements; aerodynamic calculation and selection of the appropriate fan for air circulation; selection of auxiliary equipment.

According to the given project, new powder coating oven was manufactured and installed in 2013 at the plant of OÜ Falconet Metall. The oven is successfully operated up to the present.

The frame of the oven is manufactured from the U-profile SFS5484 30/100/30x3 with 3 mm in thickness and 50x25x2 pipes with 2 mm in thickness which is made of steel. The walls of the oven are made of zinc-plated steel plate DC01 with 1 mm in thickness. Paroc and Rockwool materials are used as a thermal insulation of the oven. On the basis of the thermal calculations the total capacity of the electrical heaters is chosen to be equal to 60 kW. According to aerodynamic calculations the centrifugal fan Soler&Palau CRMT/4-400/165 is selected for air circulation. The description of the selected auxiliary equipment such as measuring and automation is also presented in the given work.

On the basis of the given work the manufacturing of another powder coating oven is planned for the “ESTRUDOOR” Company which deals with production of metal doors in Ivangorod Russia.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ИНТЕРНЕТ СТРАНИЦ

1. Группа авторов под редакцией института "Powder Coating Institute" (США). Порошковые краски. Технология покрытий. Санкт-Петербург. 2001.
2. Интернет страница фирмы производителя теплоизоляционных материалов PAROC, [www.paroc.com](http://www.paroc.com).
3. Интернет страница фирмы производителя теплоизоляционных материалов ROCKWOOL, [www.rockwool.com](http://www.rockwool.com).
4. Интернет страница "Марочник стали и сплавов", [www.splav.kharkov.com](http://www.splav.kharkov.com).
5. А.Д. Свенчанский. Электрические промышленные печи. Часть первая. Электрические печи сопротивления. Москва, 1975.
5. Интернет страница фирмы производителя печей полимеризации TRANSFER, [www.transfer-company.ru](http://www.transfer-company.ru).
6. Интернет страница фирмы производителя оборудования для линий полимерной порошковой окраски УралСпецГрупп, [www.ten74.ru](http://www.ten74.ru).
7. Aleksander Maastik, Heiti Haldre, Tiit Koppel, Leopold Paal. Hüdraulika ja pumbad. Tartu, 1995.
8. И.Е.Идельчик. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. Москва, Ленинград, 1960.
9. Интернет страница фирмы производителя промышленных вентиляторов Soler&Palau, [www.solerpalau.ro](http://www.solerpalau.ro).
10. Интернет страница фирмы производителя электроавтоматики АВВ, [www.abb.com](http://www.abb.com).
11. Интернет страница фирмы производителя ТЭН FuehlerSysteme eNET International GmbH, [www.fuehlersysteme.ru](http://www.fuehlersysteme.ru).
12. Интернет страница фирмы производителя электроавтоматики Елприз, [www.elpriz.ru](http://www.elpriz.ru).
13. Интернет страница фирмы производителя электроавтоматики ООО МТД проект, [www.mtd-proekt.ru](http://www.mtd-proekt.ru).
14. Интернет страница фирмы производителя порошковой краски ООО Фирма Гранул, [www.granulspb.ru](http://www.granulspb.ru).