

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«ПРИАЗОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**Койфман Алексей Александрович**

УДК 669.162

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ДОМЕННЫХ  
ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ПУТЕМ УВЕЛИЧЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ  
ГАЗА-ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Специальность 05.16.02 – Metallургия черных и цветных металлов и  
специальных сплавов

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук, доцент  
Симкин Александр Исаакович

Мариуполь 2016

## Постановка задачи исследования

Основными путями интенсификации работы доменных воздухонагревателей являются:

- повышение температуры греющих газов путем добавки к доменному газу природного и коксового газов и мазута;
- подогрева газа и воздуха в рекуператорах;
- применение более стойких муллито-корундовых, динасовых и других огнеупорных материалов;
- использование насадок с большой поверхностью нагрева;
- модернизация оборудования и улучшение режимов работы;
- совершенствование приборов контроля и управления.

**Цель работы.** Целью данной диссертационной работы является экспериментальное и теоретическое обоснование закономерностей теплообмена в насадке регенеративных теплообменников при увеличении давлений в их рабочем пространстве и газа-теплоносителя и повышения на этой основе эффективности их работы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **научные задачи:**

- выполнить анализ известных методов и обосновать перспективные подходы к исследованию процессов теплообмена в насадке регенеративного теплообменника;
- разработать математическую модель нагрева и охлаждения насадки регенератора с учетом давления газа-теплоносителя;
- рассчитать тепловой баланс регенеративного теплообменника, работающего под давлением;
- исследовать работу теплообменника в существующем режиме для определения адекватности модели;
- разработать экспериментальную установку для исследования влияния давления газа-теплоносителя на теплообмен в насадке;
- исследовать с использованием математической модели параметры теплообмена в доменном воздухонагревателе при повышенных значениях давления в рабочем пространстве и сравнить их с действующими;
- определить зависимость параметров теплообмена между газом-теплоносителем и насадкой регенератора от давления газа-теплоносителя;
- определить эффективность и параметры работы группы воздухонагревателей под давлением.

# Физическая модель нагрева и охлаждения насадки регенератора

Нагрев насадки

Нагрев дутья

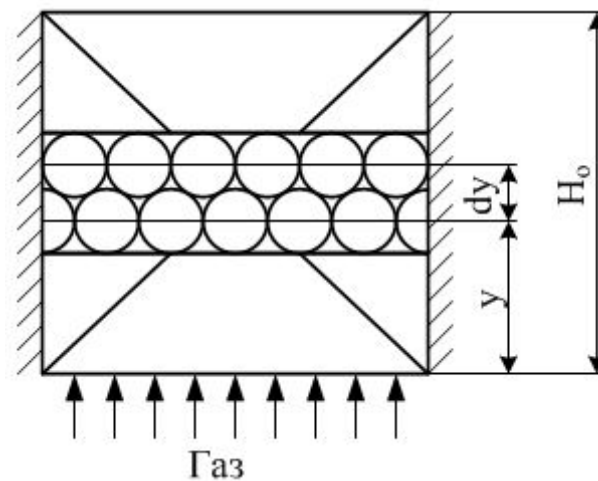
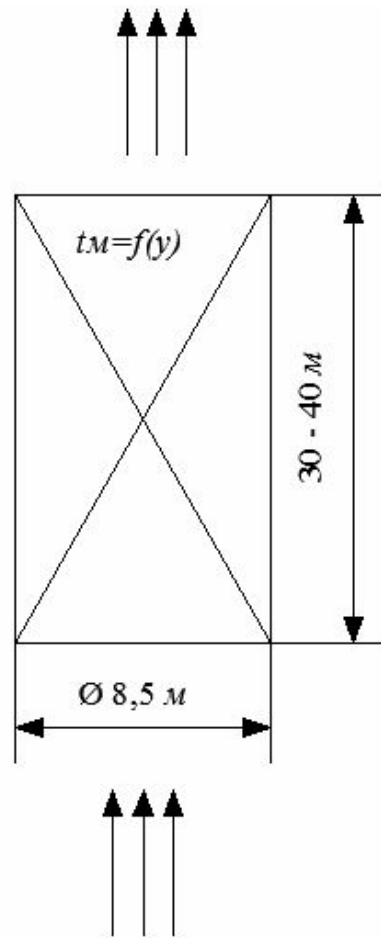
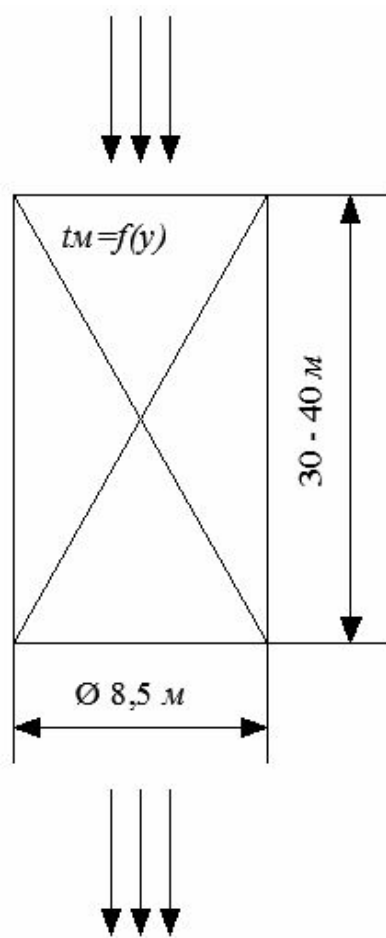


Рисунок - Неподвижный зернистый слой

Энтальпия газа в элементарном слое

Количество теплоты, которое газ отдает  
слою при прохождении через слой

Уравнение теплообмена для газа

Уравнение теплообмена для материала

## Первая рассмотренная задача нагрева регенеративной насадки

Расчеты температурных полей при нагревании неподвижного слоя шаров с постоянной по высоте начальной температурой потоком горячих газов с постоянной температурой во времени базируются на решении Т. Шумана



где  $\theta_2$  – относительная температура газа

$\eta$  – безразмерная высота насадки

$\theta_1$  – относительная температура материала насадки

$\tau$  – безразмерное время

$T_0$  – температура газа на входе в слой, °C

$T_1$  – начальная температура материала насадки,

$\beta$  – объемный суммарный коэффициент теплоотдачи,

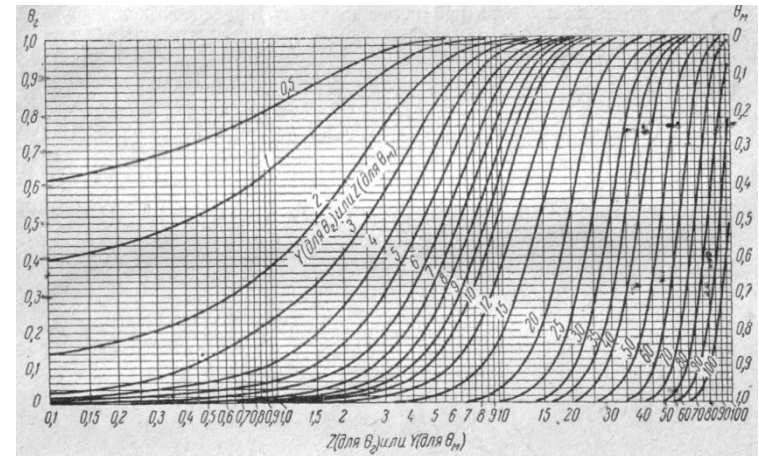
$H$  – высота слоя, расстояние по вертикали от верхней границы насадки, м

$c$  – объемная теплоемкость газа,

$\tau$  – время,

$J_0$  – функцией Бесселя первого рода нулевого порядка от мнимого аргумента

Номограмма для определения относительных температур материала и газа



**Полученные решения, позволяющие  
Определять температуры  
без использования номограмм**

Для расчета была выбрана насадка регенератора со следующими параметрами, соответствующими насадке доменного воздухонагревателя:

- высота насадки
- диаметр насадки
  - площадь горизонтального сечения регенератора
- материал насадки - шамот
- порозность
- скорость газа 0,46 м/с
- температура всей насадки в начале нагрева
- начальная температура потока газа, движущегося через насадку сверху вниз
- нагрев насадки происходит до тех пор, пока её
- температура в нижней части регенератора не достигнет
- топливо - доменный газ

Объемный коэффициент теплоотдачи определяется по формуле

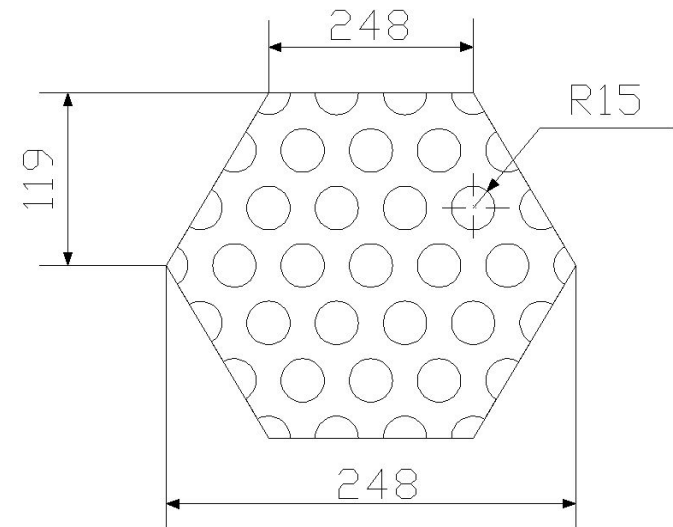


Рисунок - Шестигранный насадочный блок насадки доменного воздухонагревателя

**Основное утверждение исследования**  
**постоянство объемного расхода газа-теплоносителя при различных значениях избыточного давления.**

В этом случае повышение давления газа-теплоносителя за счет увеличения плотности позволяет увеличить массовый расход газа-теплоносителя при неизменных значениях скорости газового потока.

Повышение массового расхода теплоносителя повышает коэффициент теплоотдачи, интенсифицирует теплообмен между газом и насадкой и обеспечивает сокращение продолжительности периода нагрева.

**Скорость газа-теплоносителя в зависимости от значения избыточного давления**

Наименование	Значение		
Избыточное давление, кПа	0	50	100
Скорость фактическая, м/с	1,7	1,7	1,7
Скорость при н.у., м/с	0,46	0,69	0,92



# Результаты моделирования нагрева насадки регенератора при различных значениях давления газа- теплоносителя

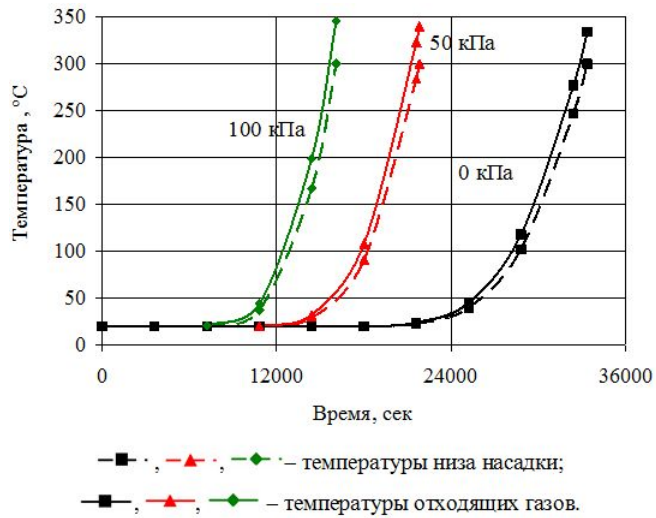


Рис. 2.7. Динамика изменения температур нижнего горизонта насадки и отходящих газов

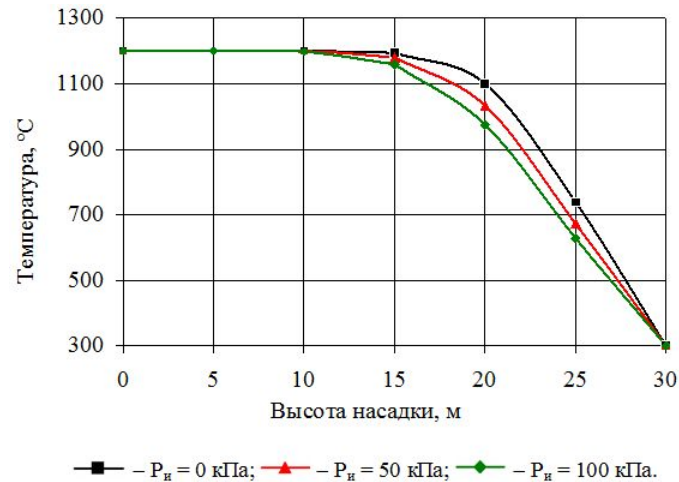


Рис. 2.8. Распределение температур по высоте насадки в конце периода нагрева при избыточном давлении в регенераторе

## газа- теплоносителя

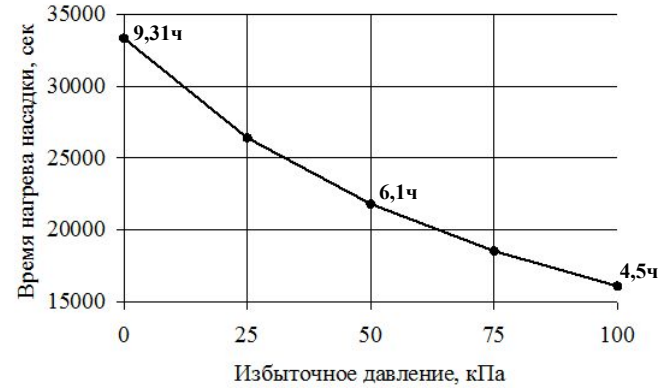


Рис. 2.6. Влияние повышения давления в рабочем пространстве регенеративного теплообменника на продолжительность нагрева насадки

### Статьи теплового баланса

Количество теплоты, переданное насадке за время нагрева

Количество теплоты, уносимой из насадки отходящими газами

Общее количество теплоты, поступающей в насадку с продуктами горения

$$Q_{пр} = C_{Г} u_{0} t'_{Г} S_{p} \tau_{кон}$$

## Тепловой баланс процесса нагрева насадки

Приход			Расход		
Статья	Кол-во теплоты, ГДж	%	Статья	Кол-во теплоты, ГДж	%
Рабочее давление регенератора					
1 Поступает с газом	1641	100	1 Аккумулируется насадкой	1601,83	97,61
			2 Уносится газом	53,04	3,23
Итого	1641	100	Итого	1654,87	100,84
Избыточное давление 50 кПа					
1 Поступает с газом	1603	100	1 Аккумулируется насадкой	1554,11	96,92
			2 Уносится газом	65,05	4,06
Итого	1603	100	Итого	1619,16	100,98
Избыточное давление 100 кПа					
1 Поступает с газом	1573	100	1 Аккумулируется насадкой	1516,56	96,42
			2 Уносится газом	72,68	4,62
Итого	1573	100	Итого	1589,24	101,04

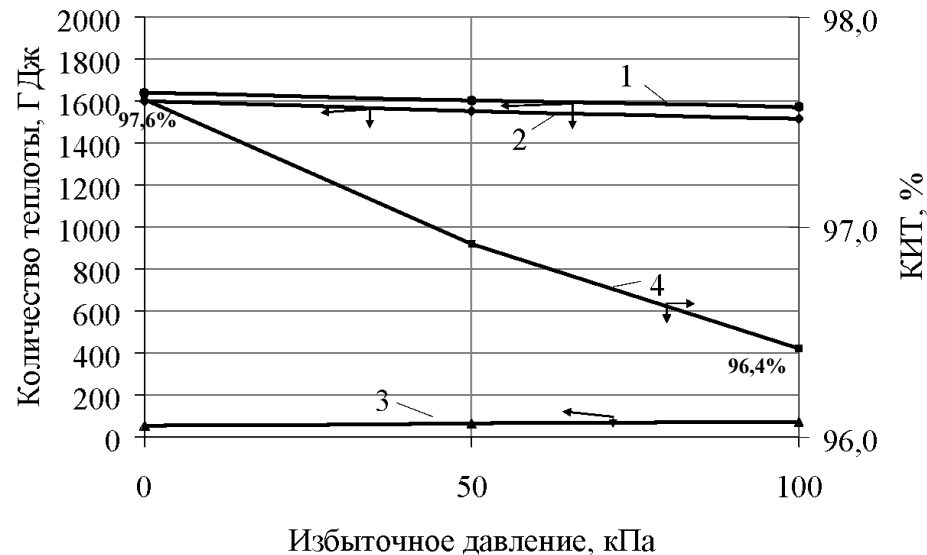


Рис. 2.12. Графики зависимостей от избыточного давления:

- количества теплоты, вносимое с продуктами горения (1);
- количество теплоты, аккумулированное насадкой (2);
- количества теплоты, выносимой отходящими газами (3);
- КИТ (4)

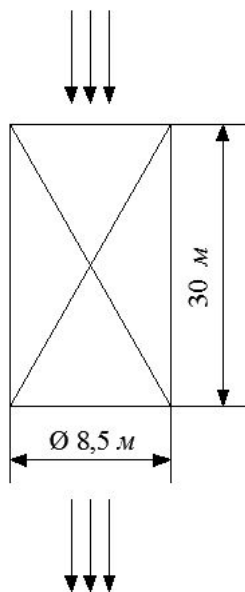
1. Расхождение теплового баланса не превышает 1,04%.
2. Снижение КИТ на 1,2%

## Вторая рассмотренная задача нагрева насадки

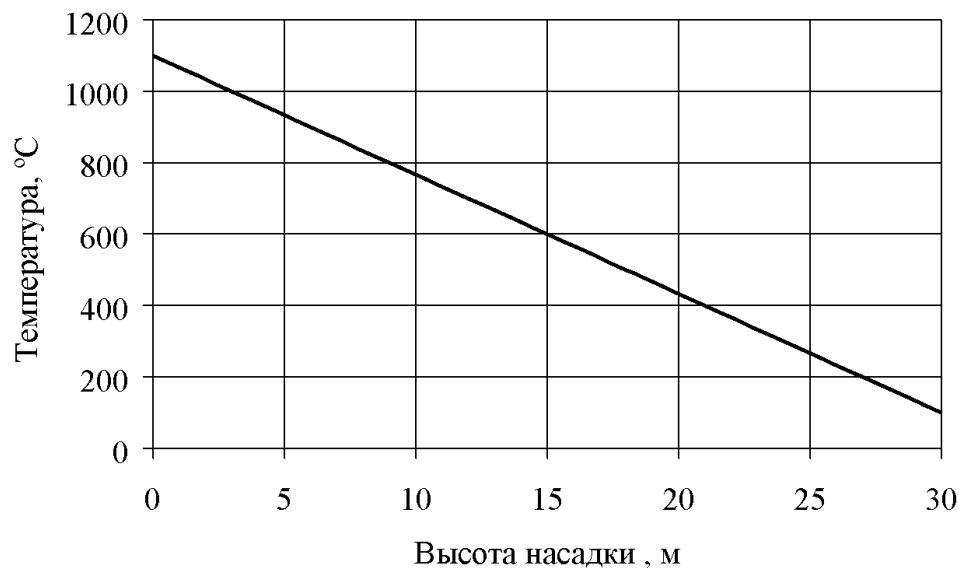
В соответствии с начальным распределением температур, приведенным выше, была поставлена задача со следующими условиями:

- температура газа на входе в насадку постоянна;
- температура насадки представляет собой функцию расстояния от верха насадки.

Начальное изменение температуры материала насадки относительно ее высоты принято линейным и представлено на рис. 2.13:



а)



б)

Рис. 2.13. Начальные условия (а) и распределение температур по высоте насадки в начале периода нагрева насадки (б)

Достаточная точность расчета достигается при разбиении высоты насадки не менее чем на 50 участков

## Результаты моделирования нагрева насадки регенератора при различных значения давления газа- теплоносителя (вторая задача)

Полученные выражения для определения температур газа и материала в насадке в любой момент времени

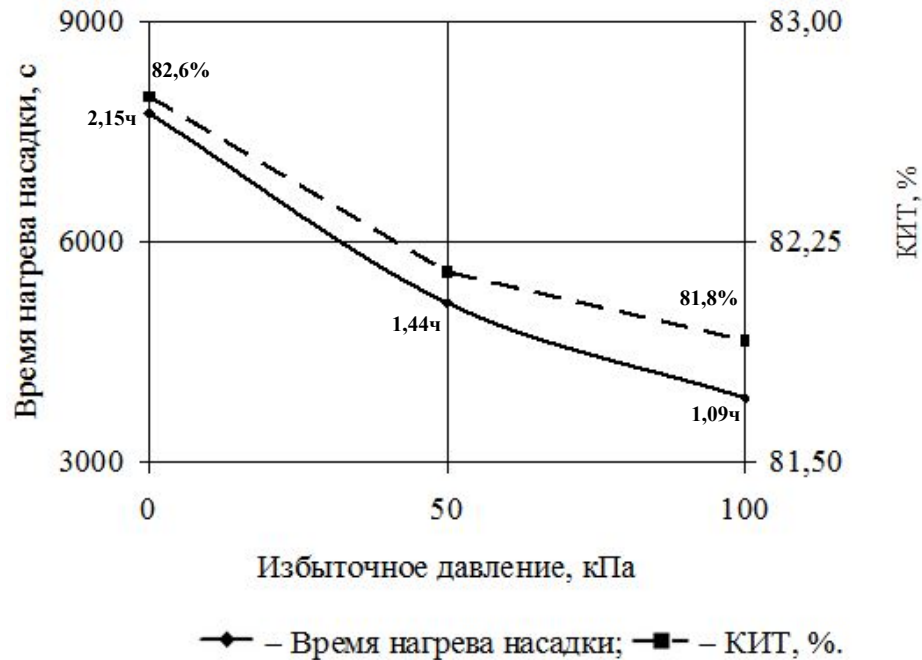


Рис. 2.14. Влияние повышения давления в рабочем пространстве воздухонагревателя время нагрева насадки и КИТ

## Общая задача теплообмена в насадке

Для анализа работы насадки реального воздухонагревателя в течение цикла «нагрев-дутье» необходимо решить общую задачу **при**

**-переменной температуре газа на входе в насадку**

**-распределение температуры материала насадки по ее высоте, отличном от равномерного**

Температура газа-теплоносителя представляет собой кусочно-линейную функцию времени

Полученные выражения для определения температур газа и материала в насадке в любой момент времени

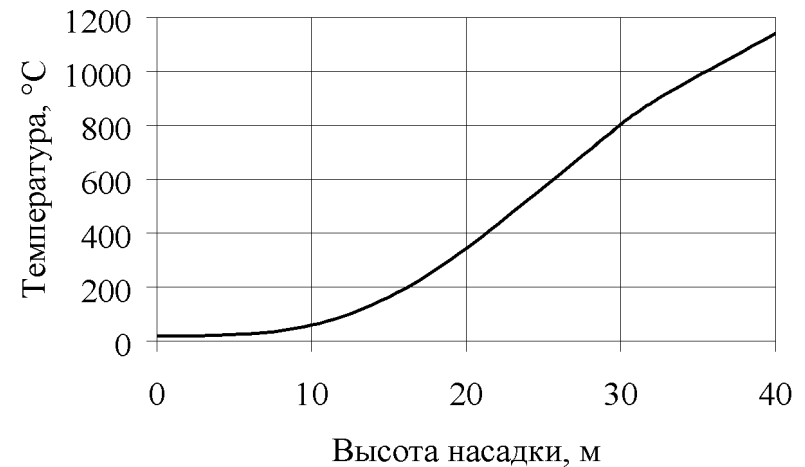
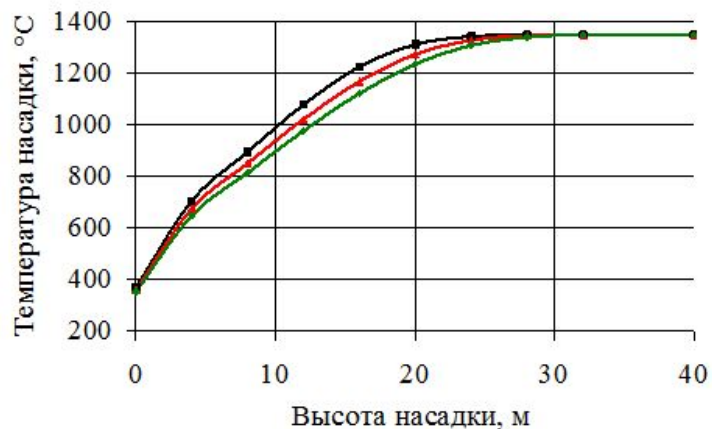


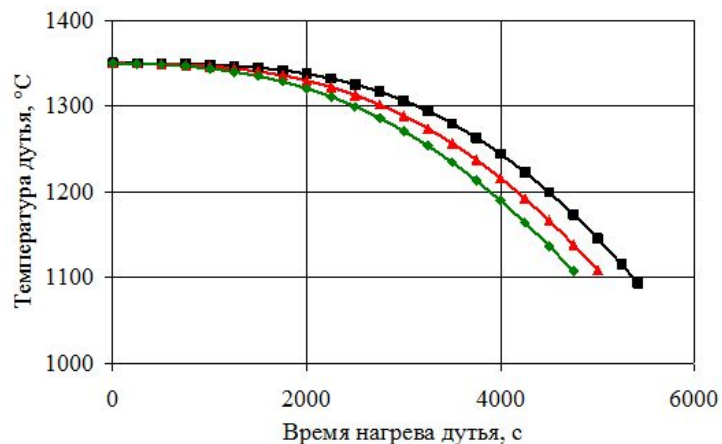
Рис. 2.16. Начальное распределение температуры материала насадки

# Результаты моделирование цикла «нагрев-дутье» насадки доменного воздуходувателя



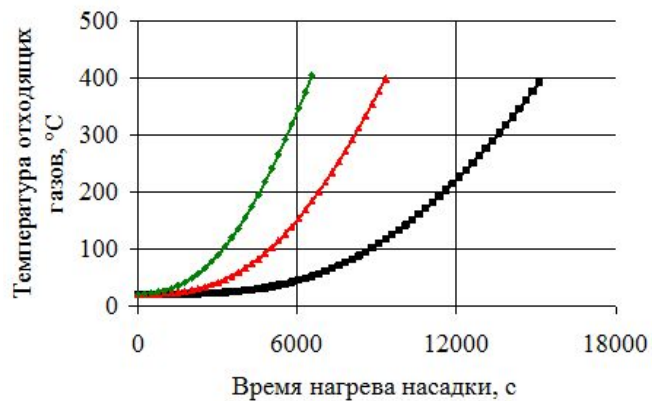
■ –  $P_n = 0$  кПа; ▲ –  $P_n = 50$  кПа; ◆ –  $P_n = 100$  кПа.

Рис. 2.17. Распределение температуры насадки в конце периода нагрева насадки при различных значениях избыточных давлений



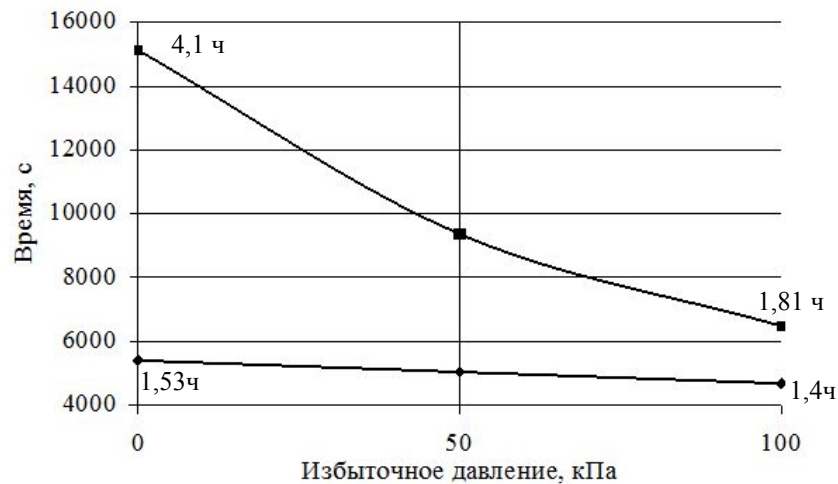
■ –  $P_n = 0$  кПа; ▲ –  $P_n = 50$  кПа; ◆ –  $P_n = 100$  кПа.

Рис. 2.19. Температура дутья на выходе из насадки во времени в период нагрева дутья при различных избыточных давлениях



■ –  $P_n = 0$  кПа; ▲ –  $P_n = 50$  кПа; ◆ –  $P_n = 100$  кПа.

Рис. 2.18. Температура отходящих газов во времени в период нагрева насадки при различных избыточных давлениях



■ – нагрев насадки; ◆ – нагрев дутья.

Рис. 2.20. Зависимость времени нагрева от избыточного давления

## Результаты моделирование цикла «нагрев-дутье» насадки доменного воздушнонагревателя

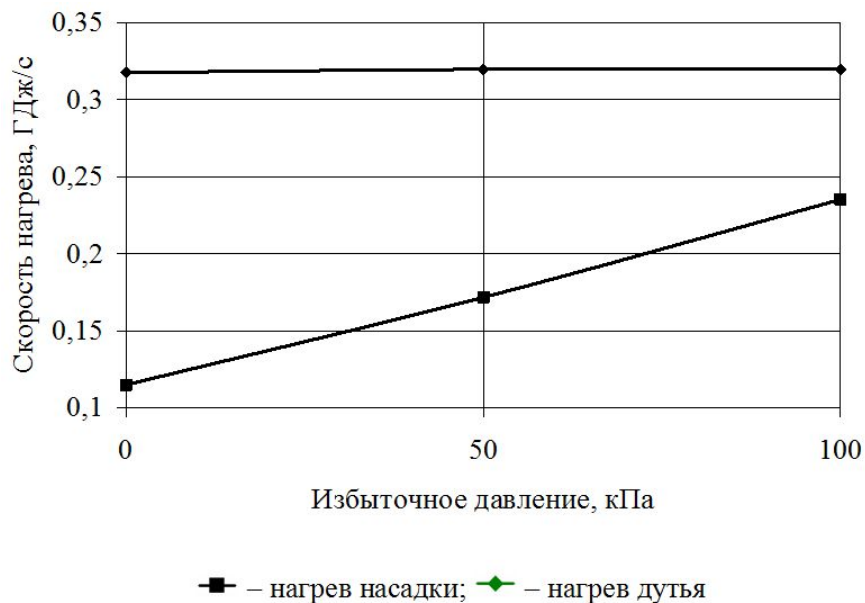


Рис. 2.21. Скорость нагрева насадки и дутья

При повышении давления газа-теплоносителя на 100 кПа наблюдается повышение скорости нагрева насадки с 0,11 до 0,23 ГДж/с при неизменной скорости нагрева дутья 0,32 ГДж/с

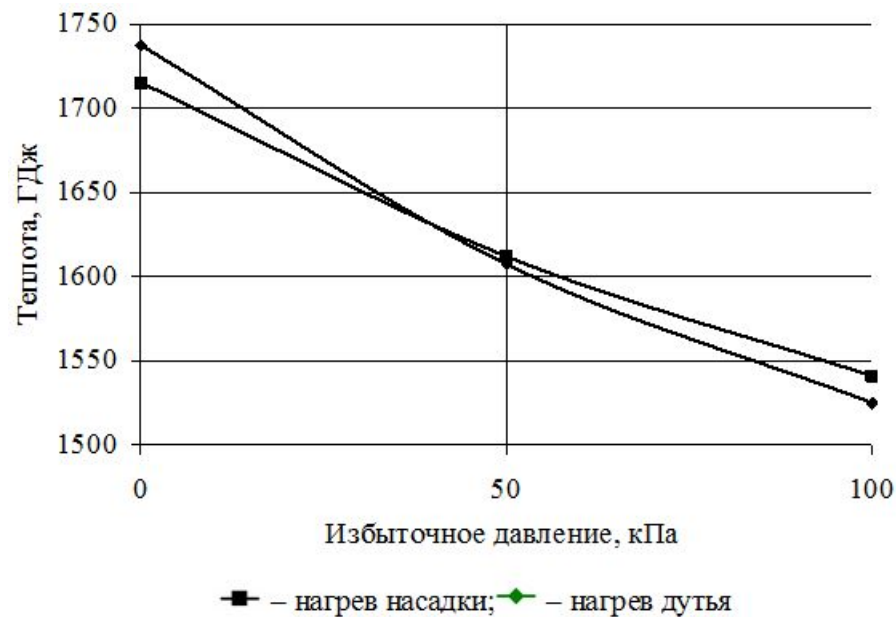


Рис. 2.22. Количество теплоты, полученной насадкой и дутьем

При повышении давления газа-теплоносителя на 100 кПа наблюдается снижение, количества теплоты наколенной насадкой и отданной дутью на 12%

# Экспериментальная установка для исследования теплообмена под давлением в регенеративной насадке

Для исследования теплообмена от газов к насадке необходимо измерять значения следующих параметров:

- температура верхнего слоя насадки  $t_B$
- температура нижнего слоя насадки  $t_H$
- температуры газа на входе в насадку  $t_{ВХ}$
- температуры газа на выходе из насадки  $t_{ВЫХ}$
- давление в насадке
- расход газа

14

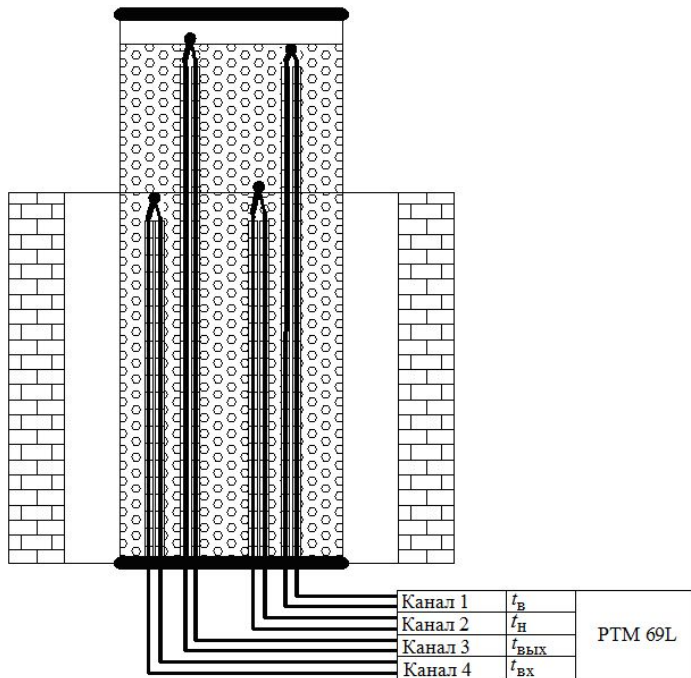


Рис. 3.5. Схема установки измерительных термопар

Рис. 3.1. Схема экспериментальной установки

- 1 - Баллон с воздухом; 2 - Редуктор ; 3 - Трубопровод ;
- 4 - Расходомер (ротаметр) ; 5 - Манометр ; 6 - Кварцевая трубка ;
- 7, 8 - Пробки со штуцерами ; 9 - Нижняя часть насыпного слоя ;
- 10 - Электрическая печь ; 11 - Верхняя часть насыпного слоя (насадка) ;
- 12 - Вентиль, для обеспечения избыточного давления ;
- 13, 14 - Контрольные точки

## Характеристики установки

- Высота нижней части насыпного слоя 0,8 м
- Высота исследуемой насадки 0,15 м
- Диаметр насадки 0,035 м
- Материал – бой шамота, средний диаметр 6,5мм



## Проведение установочных опытов

Каждый опыт включал следующие этапы:

1. Включение электропечи и нагрев нижней части слоя. Заданное значение температуры печи выставляли на 300 °С. Время достижения необходимой температуры нижней частью насадки – 3600 с.
2. Фиксация начальных значений основных измеряемых параметров (давление в баллоне, температуры низа насадки и верха насадки, температуры газа на входе в насадку и на выходе из насадки). Отсчет времени начинали с момента открытия редуктора и подачи воздуха из баллона в установку.
3. Открытие редуктора до достижения заданного расхода в соответствие с показаниями расходомера.
4. Фиксация показаний измерительных приборов (давление, расход воздуха, температура в контрольных точках 13 и 14, температура газа на входе и выходе из насадки) с интервалом 60 с.
5. Если значения температуры контрольной точки 13 (рис. 3.1) в течение последних трех измерений не увеличивалось или устанавливалось на одном значении, опыт завершался. В конце опыта фиксировали значение давления в баллоне.

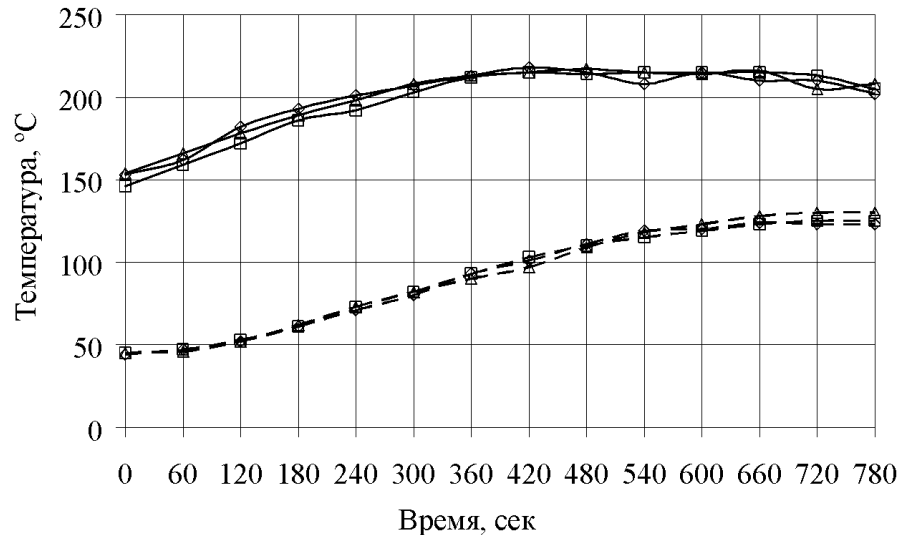


Рис. 3.6. Графики изменения температур низа и верха насадки

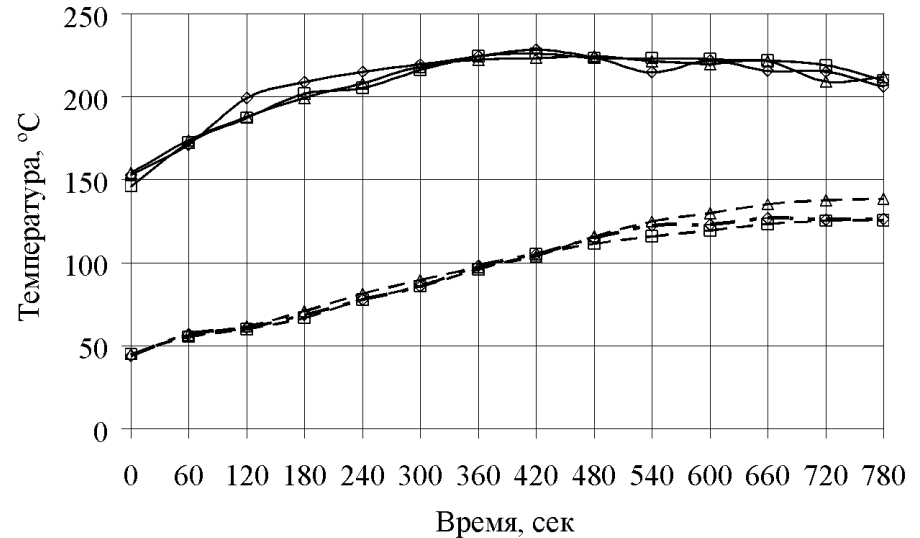


Рис. 3.7. Графики изменения температур газа на входе и выходе из насадки

## Анализ результатов экспериментального исследования

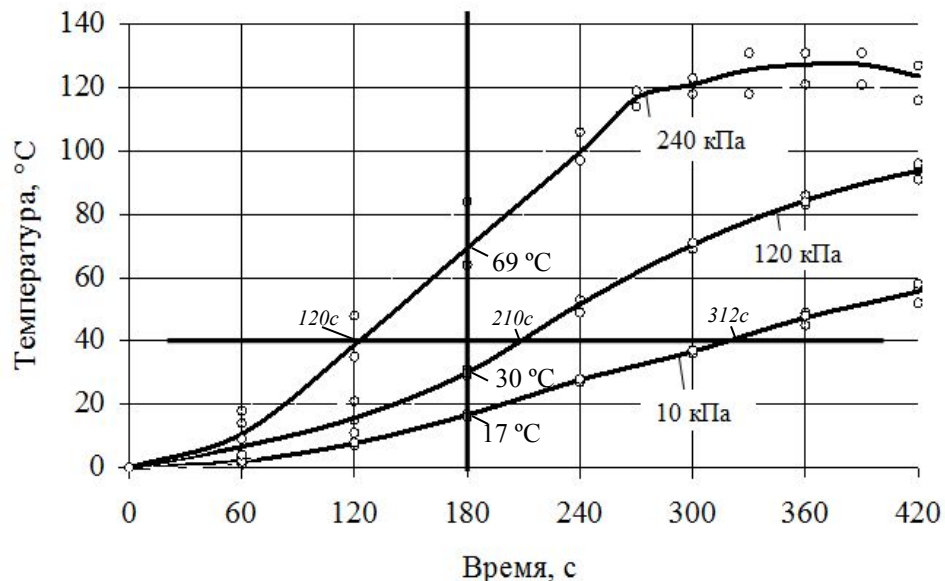


Рис. 3.13. График изменения температуры верха насадки в контрольной точке при различных значениях избыточного давления



Рис. 3.14. Количество теплоты, накопленное насадкой за 180 секунды экспериментального исследования

### Тепловой баланс установки на 180 сек при различных значениях давления газа-теплоносителя

Приход			Расход		
Статья	Кол-во теплоты, Дж	%	Статья	Кол-во теплоты, Дж	%
1	2	3	4	5	6
$P_{оп} = 10 \text{ кПа}$					
1 Поступает с газом	29394	100,00	1 Аккумулируется насадкой	5549	18,88
			2 Уносится газом	9430	32,08
			3 Потери	14415	49,04
Итого	29394	100,00	Итого	29394	100,00
$P_{оп} = 120 \text{ кПа}$					
1 Поступает с газом	59479	100	1 Аккумулируется насадкой	7836	13,18
			2 Уносится газом	29623	49,80
			3 Потери	22020	37,02
Итого	59479	100,00	Итого	59479	100,00
$P_{оп} = 240 \text{ кПа}$					
1 Поступает с газом	114339	100	1 Аккумулируется насадкой	16062	14,05
			2 Уносится газом	60879	53,24
			3 Потери	37398	32,71
Итого	114339	100,00	Итого	114339	100,00

## Теплообмен в экспериментальной насадке

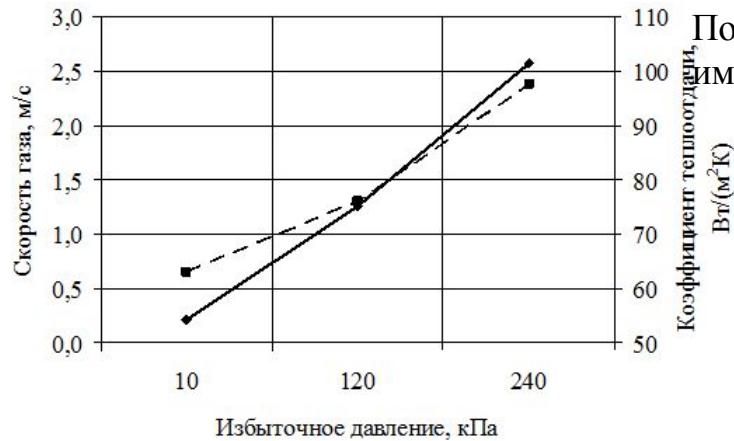


Рис. 3.15. Зависимости скорости газа  $\blacksquare$  и коэффициента теплоотдачи  $\blacklozenge$  от избыточного давления

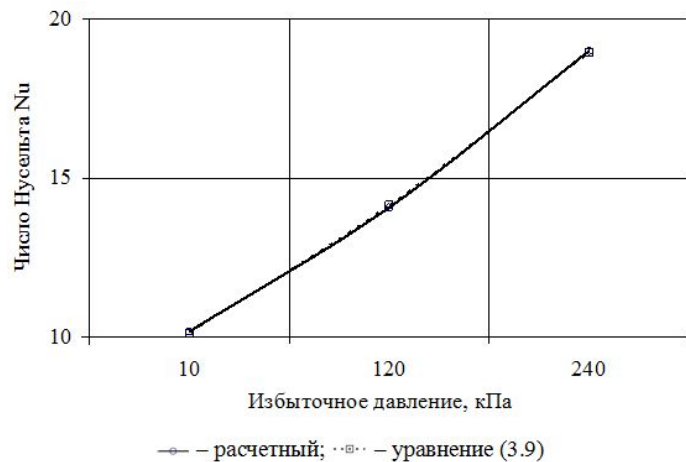


Рис. 3.15. Зависимость Числа Нуссельта от избыточного давления

## Проверка адекватности модели

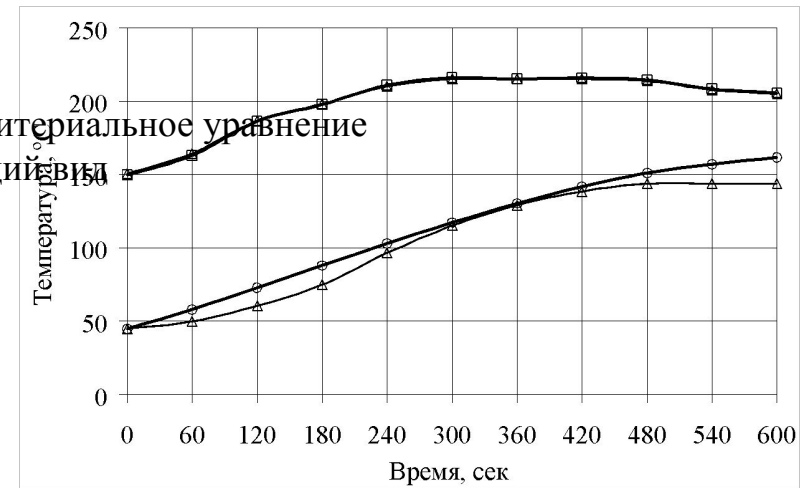


Рис. 3.17. Сравнение температур низа и верха насадки по данным эксперимента и модели при избыточном давлении

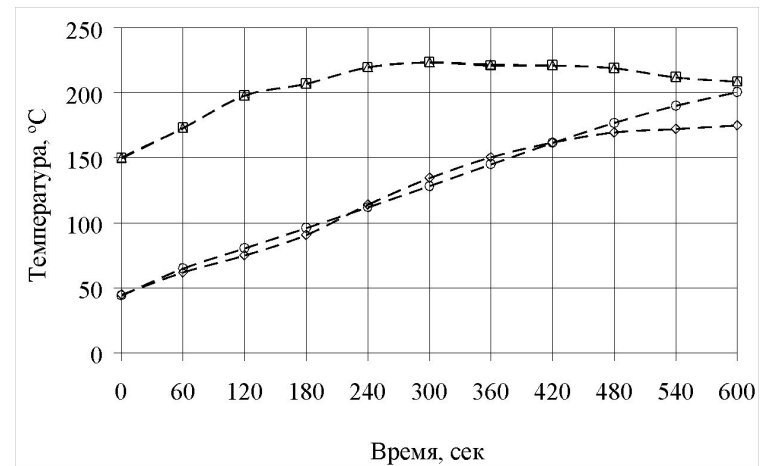


Рис. 3.18. Сравнение температур газа на входе и выходе из насадки по данным эксперимента и модели при избыточном давлении

## Экспериментальное определение влияния давления газа-теплоносителя на нагрев регенеративной насадки воздухонагревателя доменной печи

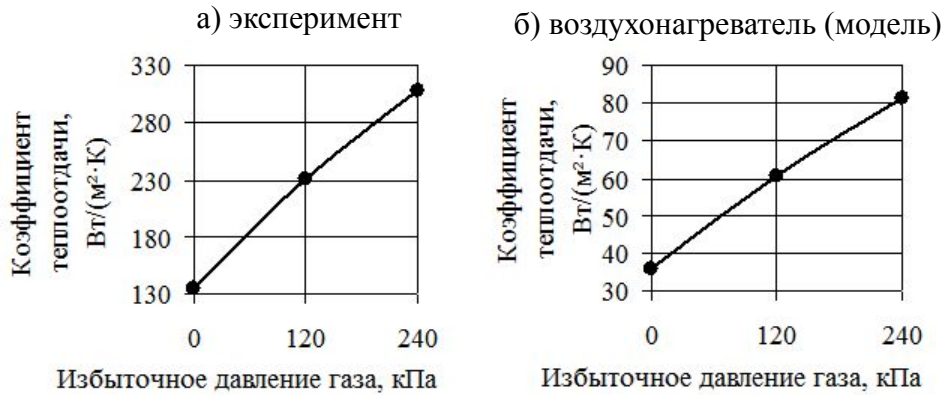


Рис. 3.19 Зависимость коэффициента теплоотдачи от избыточного давления газа-теплоносителя

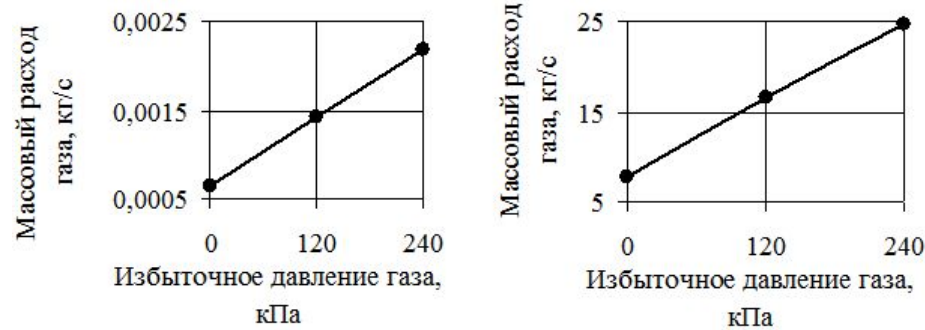


Рис. 3.20. Зависимость массового расхода газа от избыточного давления газа-теплоносителя

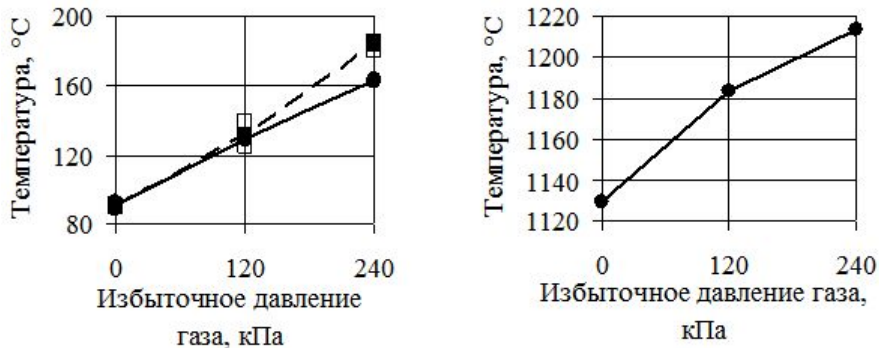


Рис. 3.21. Температуры контрольной точки при различных значениях избыточного давления газа-теплоносителя

Необходимыми и достаточными условиями теплового подобия процессов нагрева насадок согласно являются:

- геометрическое подобие;
- подобие условий движения жидкости или газа при входе;
- подобие физических свойств в сходственных точках модели и образца (постоянство отношений плотностей, коэффициентов вязкости и т.д.);
- подобие температурных полей на границах;
- сопоставимость значений определяющих чисел подобия ( $Re$  и  $Pr$ ) в каком-либо одном сходственном сечении.

Для расчета нагрева насадки реального воздухонагревателя выбрано следующее критериальное уравнение

# Определение параметров цикла работы доменного воздухонагревателя в зависимости от реализации режима нагрева насадки и требуемой температуры горячего дутья

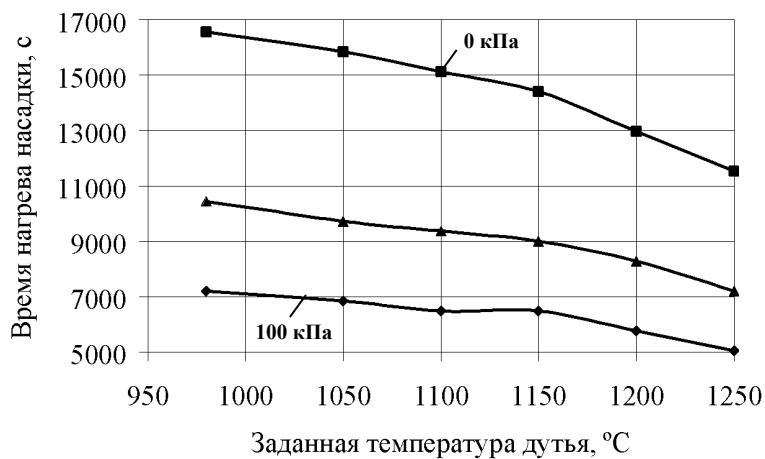


Рис. 4.3. Графики зависимости продолжительности периода нагрева насадки от заданной температуры при различных избыточных давлениях в рабочем пространстве

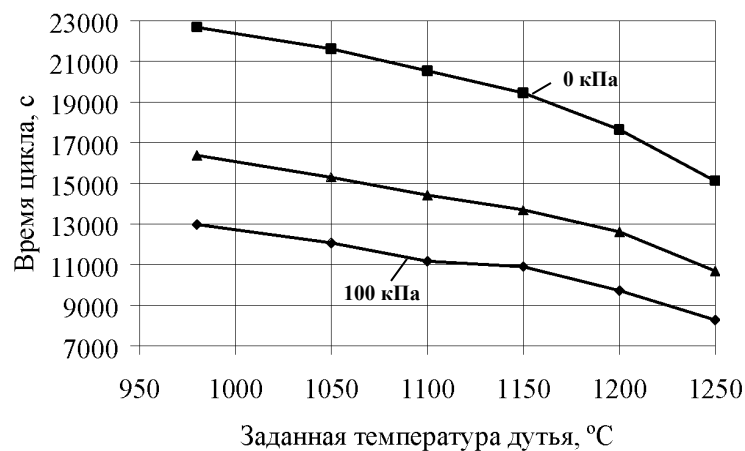


Рис. 4.5. График зависимости изменения продолжительности цикла при различных избыточных давлениях в рабочем пространстве

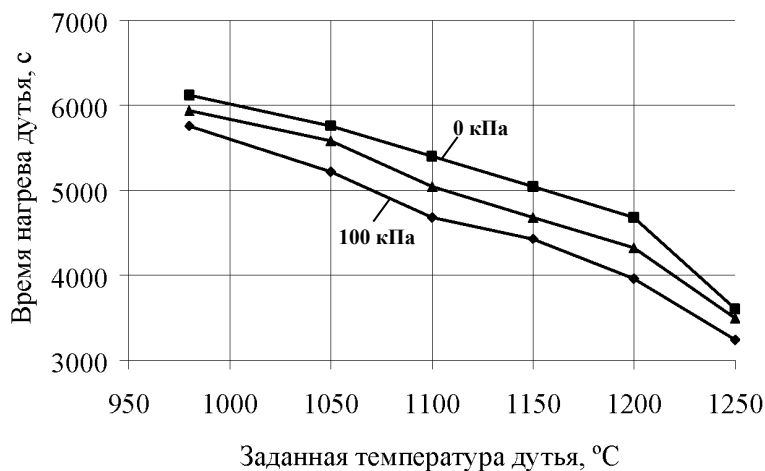


Рис. 4.4. График зависимости продолжительности периода нагрева дутья от заданной температуры при различных избыточных давлениях в рабочем пространстве

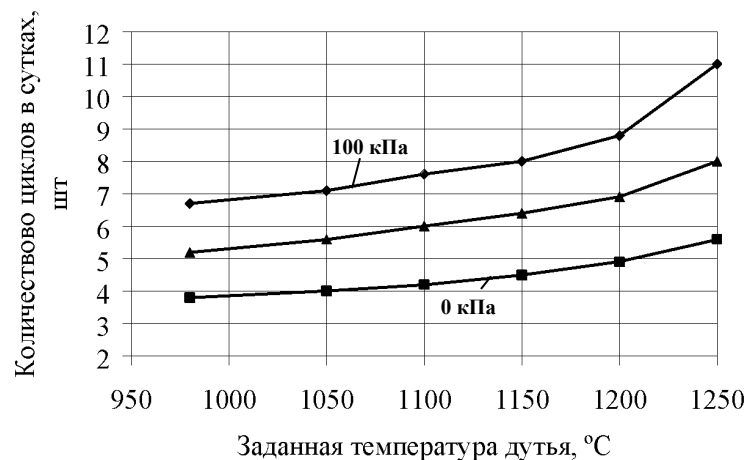


Рис. 4.6. График зависимости количества циклов в сутках от заданной температуры при различных избыточных давлениях в рабочем пространстве

—■— 0 кПа; —▲— 50 кПа; —◆— 100 кПа.

# Исследование блока воздухонагревателей доменной печи МК «АЗОВТСАЛЬ»

Техническая характеристика и эксплуатационные параметры блока

Параметр	Единица измерения	Номер воздухонагревателя			
		ВН №1	ВН №2	ВН №3	ВН №4
Высота насадки	м	38,826	38,826	38,731	35,354
Диаметр насадки	м	7,8	7,8	7,8	7,8
Площадь сечения насадки	м <sup>2</sup>	47,78	47,78	47,78	47,78
Диаметр ячейки насадки	м	0,04	0,04	0,04	0,04
Порозность насадки	м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,376	0,376	0,376	0,376
Номинальная Производительность горелок	кг/м <sup>3</sup>	48000	48000	48000	48000
Средний расход доменного газа	м <sup>3</sup> /ч	40405	17473	40275	51816
Средняя температура дыма после окончания периода нагрева	°С	387	374	391	387
Средняя температура купола после окончания периода нагрева	°С	1297	1190	1276	1274
Время нагрева насадки	с	12948	13215	13668	13601
Температура холодного дутья	°С	100	100	100	100
Средняя температура купола после окончания периода дутья	°С	1243	1134	1189	1203
Время дутья	с	7257	8939	9349	8818
Заданная температура дутья	°С	980	980	980	980
Расход дутья	м <sup>3</sup> /мин	2500	967,5	1532,5	2500

Оценка временных параметров работы блока в рассматриваемый период

Длительность периода, мин	Количество обработанных периодов (значимых)			
	ВН №1	ВН №2	ВН №3	ВН №4
Нагрева насадки				
От 121 до 180	50	49	25	19
От 181 до 240	505	470	293	308
Более 241	98	156	144	121
Нагрева дутья				
До 120	25	71	64	86
От 121 до 180	387	522	253	461
От 181 до 240	109	71	98	74

## Настройка математической модели

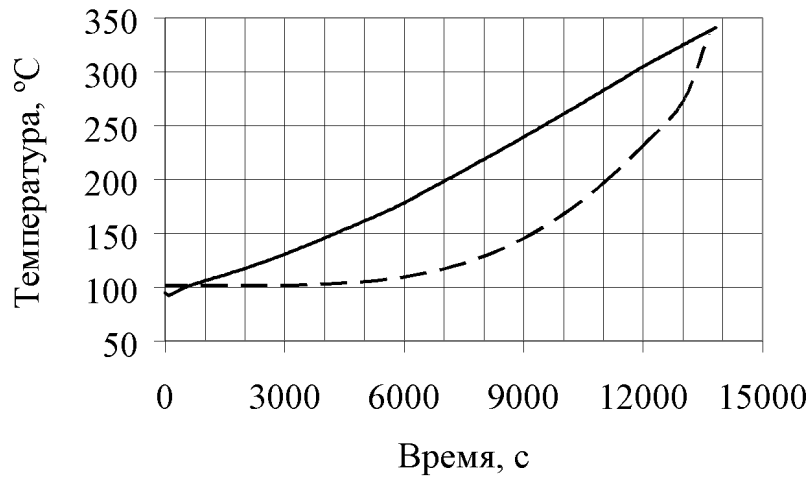


Рис. 4.7. Изменение температуры поднасадочного пространства (реальный воздухонагреватель) и газа-теплоносителя в нижнем слое насадки (модель) в течение периода **нагрева насадки**

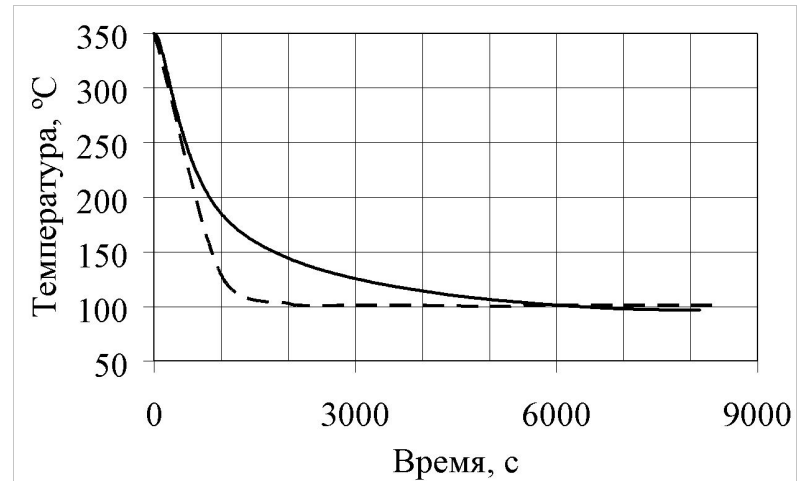


Рис. 4.8. Изменение температуры поднасадочного пространства (реальный воздухонагреватель) и газа в нижнем слое насадки (модель) в течение периода **нагрева дутья**

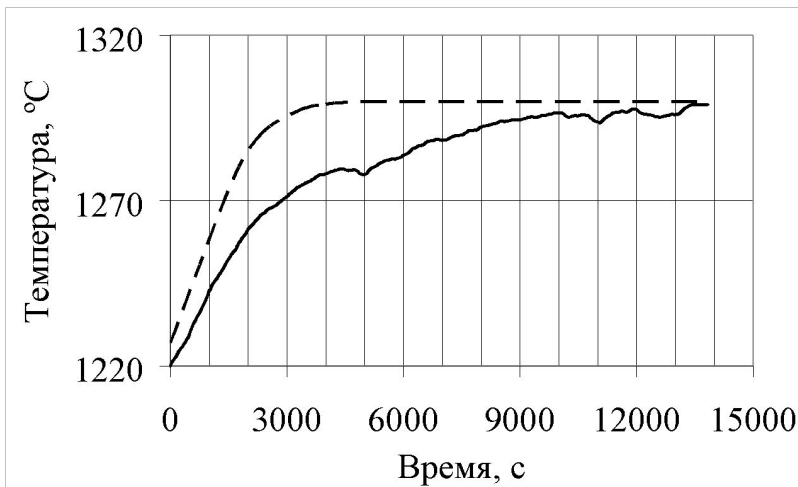


Рис.4.9. Изменение температуры купола в период **нагрева насадки**

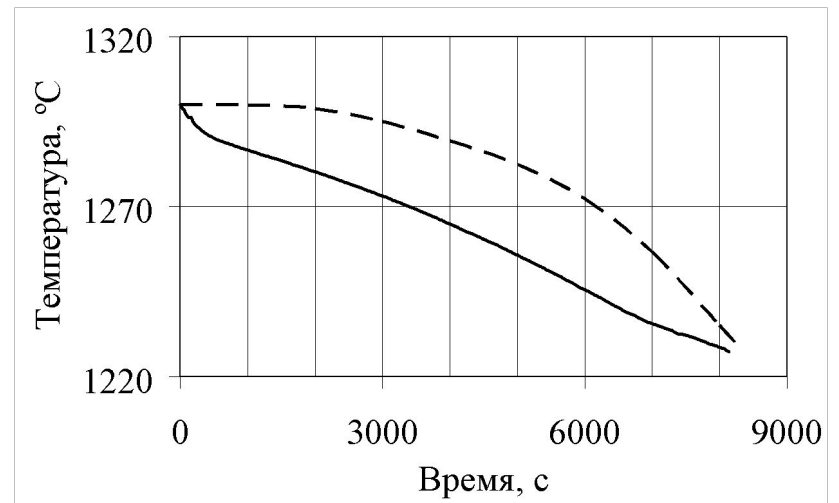


Рис. 4.10. Изменение температура купола в период **нагрева дутья**

— — реальный ВН; -- -- модель;

## Временные характеристики воздухонагревателя в зависимости от заданной температуры дыма при различных значениях заданной температуры дутья

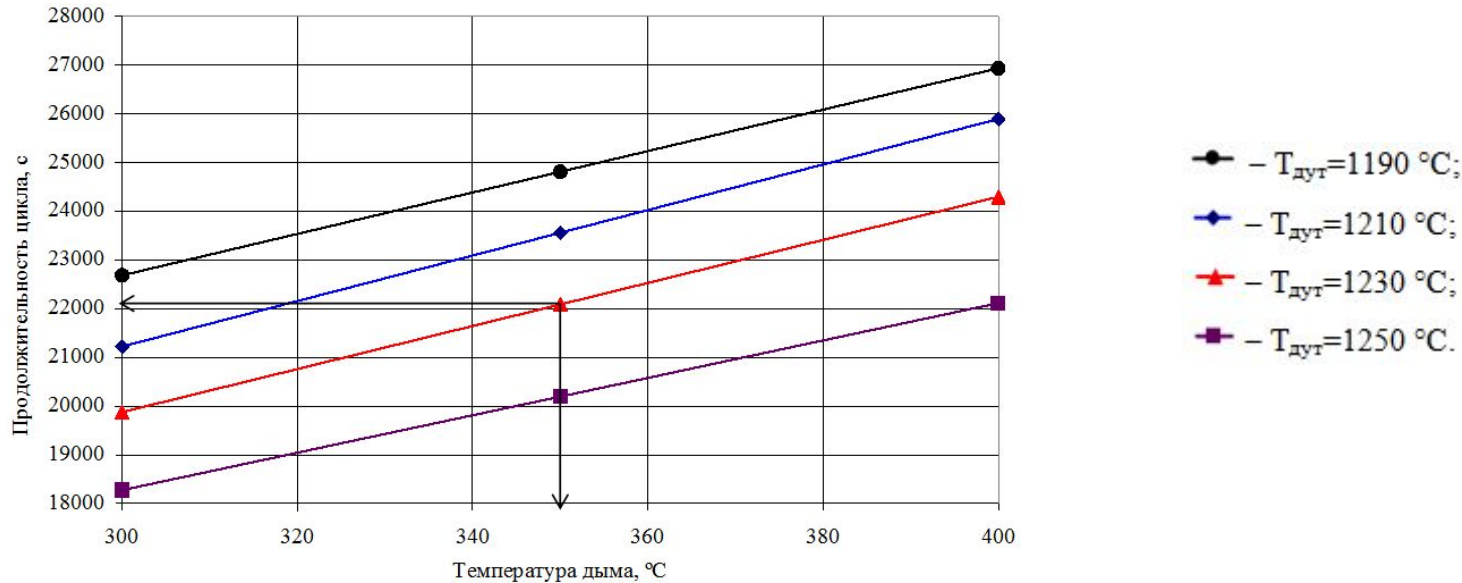


Рис. 4.11. Зависимости продолжительности цикла «нагрев+дутье» от температуры дыма при различных заданных значениях температуры дутья  $T_{\text{дуть}}$  для ВН№1

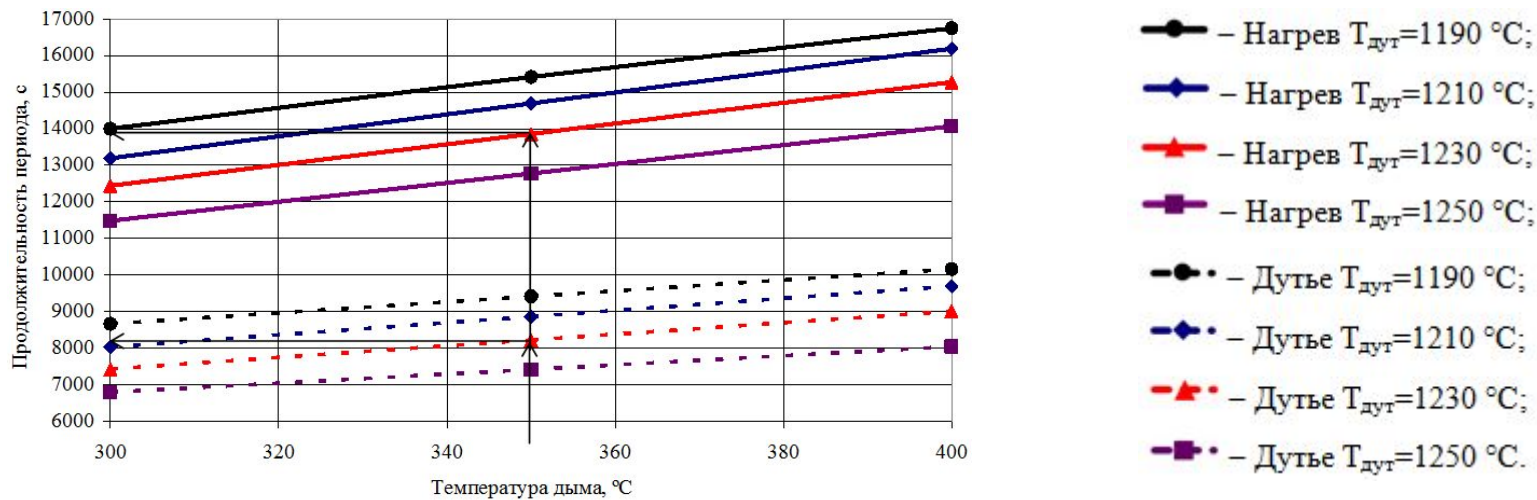


Рис. 4.12. Зависимости продолжительности периодов нагрева насадки и нагрева дутья от температуры дыма при различных заданных значениях температуры дутья  $T_{\text{дуть}}$  для ВН№1



## Примеры разработанных режимных карты блока воздухонагревателей



Рис. 4.13. Режимная карта БВН

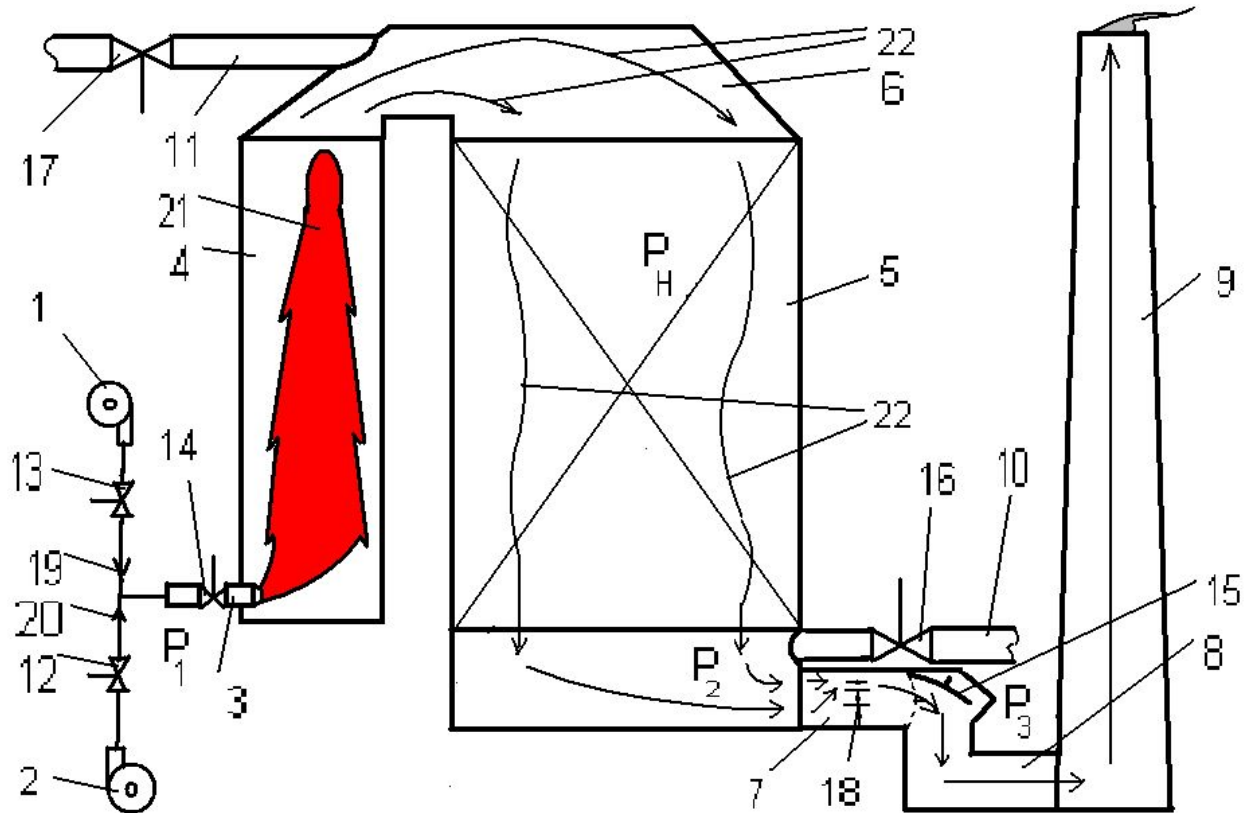


Рис. 4.14. Скорректированная режимная карта БВН

## Сводная таблица разработанны режимов блока воздухонагревателей

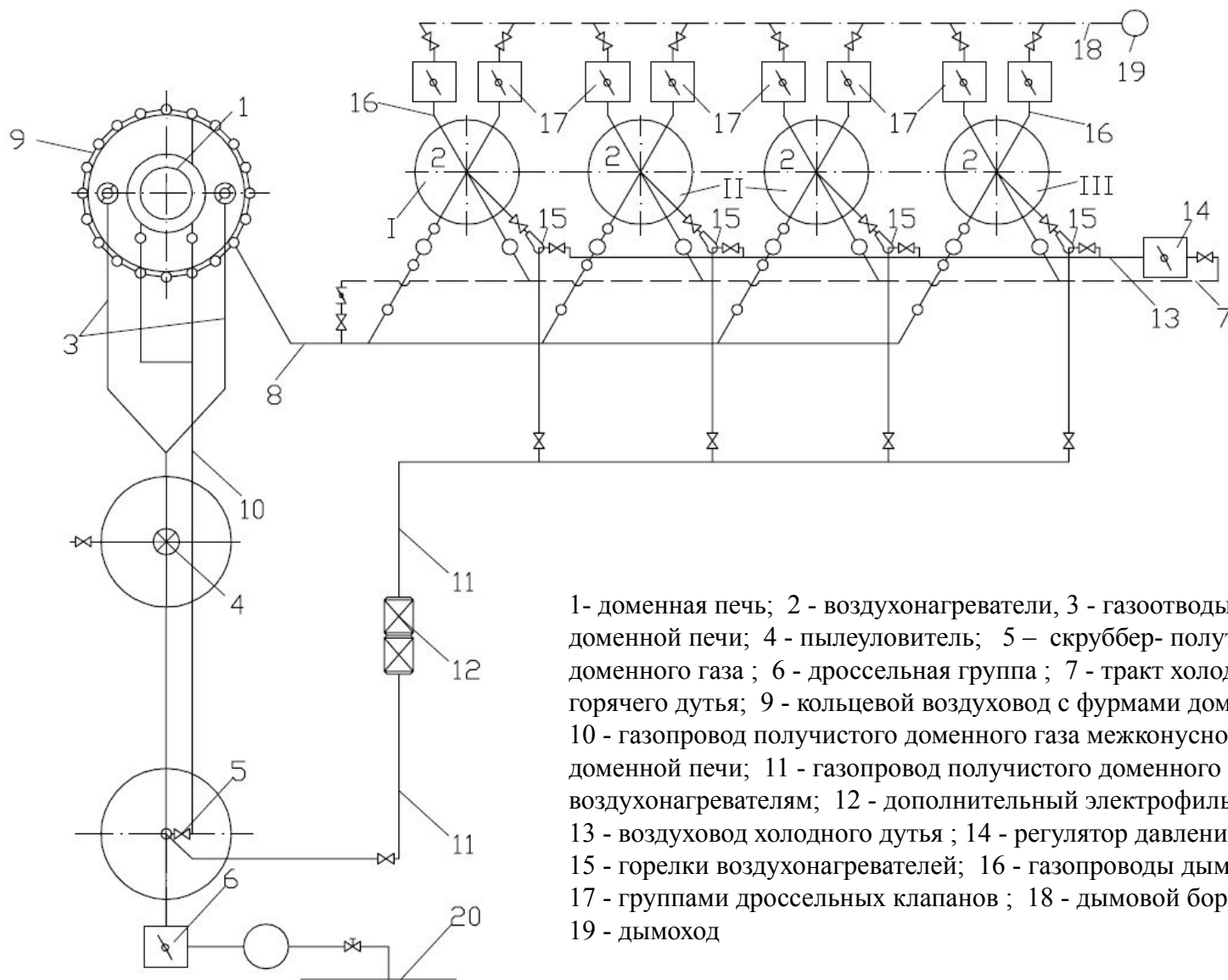
Номер режимной карты	Количество ВН в блоке	Номер воздухонагреват еля	Избыточное давление в воздухонагреват еле в период нагрева, кПа	Заданные значения			Температура дутья, поступающего в домашнюю печь, °С	Параметры цикла "Нагрев- Дутье"			Расход		Объем иhrасх одованног о доменного газа за сутки, x 10 <sup>5</sup> м <sup>3</sup>	Объем дутья за сутки, x 10 <sup>5</sup> м <sup>3</sup>	Изменение суточного потребления газа, %
				Температур а купола в период нагрева, °С	Температур а дутья в период нагрева, °С	Температур а дутья в конце режима дутья, °С		Время нагрева, с	Время дутья, с	Среднее количес тво переключ ений за сутки	Доменно го газа, м <sup>3</sup> /с	Дутья, м <sup>3</sup> /мин			
1	4	1	0	1300	300	1200	980	16489	8333	7	36937	2500	18	36	-
		2		1195	340	1150		16322	8500		15695	967,5			
		3		1295	365	1230		16322	8500		30311	1532,5			
		4		1300	375	1210		16239	8583		39471	2500			
2	4	1	0	1300	300	1220	990	14900	7750	7,75	38507	2500	17,4	36	-3
		2		1195	400	1175		15150	7500		16172	967,5			
		3		1295	350	1235		13150	9500		33207	1532,5			
		4		1300	400	1240		14650	8000		41502	2500			
3	3	1	0	1300	300	1250	992	11650	6750	9	44099	2500	18,4	36	+2
		3		1295	400	1250		13150	5250		31432	2500			
		4		1300	300	1230		11400	7000		45965	2500			
4	3	1	25	1300	300	1250	996	11316	6250	9,7	33802	2500	16,5	36	-8
		3		1295	400	1250		12400	5166		25806	2500			
		4		1300	300	1230		10816	6750		36612	2500			
5	3	1	25	1300	320	1250	1000	11166	6500	10,7	35935	2500	18,8	36	+2
		3		1295	400	1250		12500	5167		25600	2500			
		4		1300	340	1250		11066	6600		36436	2500			
6	3	1	25	1300	300	1270	1011	8800	5250	11,7	37926	2500	18,0	36	0
		3		1295	400	1270		8850	4200		27939	2500			
		4		1300	340	1270		8850	5200		37966	2500			
7	3	1	25	1300	310	1280	1015	7600	4500	14,7	39079	2500	19,6	36	+9
		3		1295	400	1280		8500	3600		27733	2500			
		4		1300	357,5	1280		7500	4600		40747	2500			
8	3	1	50	1300	300	1280	1021	6600	4100	15,3	34091	2500	20,0	36	+11
		3		1295	390	1280		7600	3100		23860	2500			
		4		1300	340	1280		6600	4100		34667	2500			
9	3	1	50	1300	300	1285	1023	5800	3700	17,0	35690	2500	20,5	36	+14
		3		1295	400	1285		6700	2800		25313	2500			
		4		1300	300	1285		5900	3600		34983	2500			

## Схема регенеративного теплообменника (патент Украины 88584)



- 1- газодувка, 2 - воздуходувка, 3 - горелка; 4 - камера сжигания;  
 5 - насадка; 6 - подкупольное пространство; 7 - газоотвод дымовых газов;  
 8 - дымовой боров; 9 - дымовая труба; 10 - воздухопровод холодного дутья;  
 11 - воздухопровод горячего дутья; 12 - клапан подачи воздуха;  
 13 - клапан подачи газообразного топлива; 14 - отсечной клапан горелки;  
 15 - дымовой клапан; 16 - клапан холодного дутья; 17 - клапан горячего дутья;  
 18 - дроссельный клапан; 19 - газообразное топливо, 20 - воздух;  
 21 - факел; 22 - дымовые газы

## Схема газового хозяйства доменной печи (патент Украины 88584)



**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**