

как они могут быть реализованы в основном путем усиления тепловой защиты (улучшение качества изоляции, экранирование, электрообогрев наиболее остываемых зон) и организации рационального управления остыванием трубопроводов, задвижек, клапанов и собственно турбины. Управление остыванием этих узлов позволит обеспечить наилучшую предпусковую готовность турбоагрегатов и сократить продолжительность их пусков в 1,5-2,5 раза.

Выводы

Предложены двухмерные математические модели для автономного исследования процессов остывания роторов и корпусов, с достаточной полнотой учитывающие тепловое взаимодействие между ними в системе цилиндра через приведенные коэффициенты теплопередачи, где отражено термическое сопротивление всех металлических и газовых слоев, расположенных между исследуемыми телами.

Выполненные на моделях исследования показали, что, затормаживая процессы остывания в местах наибольших стоков тепла (опорные лапы цилиндров, патрубки трубопроводов и др.) улучшением изоляции, экранированием и управляемым электрообогревом, можно существенно увеличить предпусковой температурный уровень деталей и сократить продолжительность пусков турбин типа К-300-240 и К-500-240 в 1,5–2,5 раза.

Литература

1. *Переверзев Д. А.* Совершенствование объемных математических моделей остывания паровых турбин после остановок мощных энергоблоков тепловых электростанций / Д. А. Переверзев, Н. Ю. Бабак, Ж. А. Шелехина // Пробл. машиностроения. – 2012. – Т. 14, № 5. – С. 3–11.
2. *Переверзев Д. А.* Синтез рационального теплового состояния теплоэнергетического оборудования / Д. А. Переверзев. – Киев: Наук. думка, 1987. – 136 с.
3. *Переверзев Д. А.* Совершенствование маневренных характеристик модернизируемых паровых турбин типа К-300–240 методами управления их тепловым состоянием / Д. А. Переверзев, А. Г. Лебедев, Н. А. Борисов // Пробл. машиностроения. – 2006. – Т. 9, № 1. – С. 3–18.

Поступила в редакцию
26.11.11

УДК 536.242

В. К. Шаров, канд. техн. наук

Н. А. Сафонов, канд. физ-мат. наук

Б. И. Компаниец

Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины
(г. Харьков, e-mail: matsevit@ipmach.kharkov.ua)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ СУШКИ ПРОПИТАННЫХ ЛАКОМ ОБМОТОК ЭЛЕКТРОМАШИН

Предложены конструктивные изменения вентиляционной системы сушильных печей и определены минимально необходимые объемы воздуха, обеспечивающие взрывобезопасный режим сушки пропитанных изоляционным лаком обмоток электромашин. При расчетах объемов воздуха учитывалось изменение интенсивности испарения растворителей в процессе сушки.

Запропоновані конструктивні зміни вентиляційної системи сушильних печей та визначені мінімально необхідні об'єми повітря, які забезпечують вибухобезпечний режим сушіння насичених ізоляційним лаком обмоток електромашин. Під час розрахунків об'ємів повітря враховувалась зміна інтенсивності випаровування розчинників в процесі сушіння.

Введение

Для сушки якорей тяговых двигателей, генераторов, катушек статоров тепловозной тяги и других аналогичных электротехнических изделий, имеющих обмотки, пропитываемые в процессе изготовления изоляционным лаком и покрытых лакокрасочным материалом (ЛКМ), в электротехнической промышленности широко используют конвективные и конвективно-радиационные сушильные печи периодического действия. Обычно выполняют две (иногда три) пропитки, окраску и после каждой операции сушат и запекают изделие в высокотемпературной среде (150–200 °С), выдерживая несколько часов [1, 2]. В процессе сушки пары растворителей лака могут создать в печи взрывоопасную смесь с воздухом, используемом в качестве теплоносителя. Воздух предварительно нагревают в электрических калориферах, располагаемых вне сушильной камеры печи. С целью экономии тепловой энергии вентиляционная система работает в режиме частичной рециркуляции теплоносителя. Основной расход энергии идёт на поддержание температуры теплоносителя и частичное удаление его с парами растворителей [3]. В статье обоснована методика, с помощью которой можно рассчитать интенсивность испарения и интегральный выход паров растворителей ЛКМ в любой момент сушки, а также время испарения основной массы растворителей. Экономически обоснован двухступенчатый режим вентиляции и предложено изменение конструкции вентиляционной системы. Рассчитана производительность вентиляторов традиционной и предлагаемой схем вентиляции. Определен необходимый воздухообмен из условий взрывобезопасности и экономический эффект при использовании двухступенчатого режима вентиляции. Приведены соответствующие графики.

Все расчёты основаны на результатах экспериментальных исследований, проведенных в 1975–1989 годах в лаборатории теплофизики и гидравлики Высшей инженерной пожарно-технической школы МВД СССР (ВИПТШ МВД СССР) и на опытно-промышленных сушильных печах Харьковского научно-производственного объединения «Электротяжмаш» [4, 5].

1 Методика расчёта интенсивности испарения растворителей и разбавителей ЛКМ в процессе сушки электротехнических изделий**1.1 Основные понятия и обозначения, используемые в расчетной модели**

В основу расчётной модели интенсивности испарения растворителей ЛКМ заложены следующие предпосылки:

- – скорость испарения растворителя в процессе сушки изделия пропорциональна абсолютному содержанию его в ЛКМ на данный момент сушки;
- – общая интенсивность испарения складывается из интенсивности испарения растворителя с покрытой лаком и омываемой теплоносителем поверхности изделия и из интенсивности испарения растворителя, находящегося в порах и пустотах изоляции обмоток и пазах (из глубоких слоёв).

Ниже приведены обозначения величин, входящих в модель и дана методика их определения.

$M_{\text{л}}$ – суммарная масса ЛКМ, израсходованная на покрытие поверхности изделия и пропитку его обмоток;

$M_{\text{н}}$ – масса растворителя, находящегося в ЛКМ до начала сушки изделия;

$M(\tau)$ – масса испарившегося растворителя на данный момент сушки;

$M = M_{\text{н}} - M(\tau)$ – уменьшающаяся в процессе сушки масса растворителя;

$M_{\text{т}}$ – масса ЛКМ в абсолютно высушенном состоянии (масса сухого остатка);

$W_0 = \frac{M_{\text{н}}}{M_{\text{н}} + M_{\text{т}}} \cdot 100\%$ – отношение массы растворителя в составе ЛКМ до начала

сушки к общей массе ЛКМ; регламентируется технологической инструкцией и зависит от требуемой рабочей вязкости ЛКМ; обычно даётся в процентах;

$W_T(\tau) = \frac{M_H - M(\tau)}{M_T}$ – отношение массы растворителя, содержащегося в ЛКМ в процессе сушки, к массе ЛКМ в абсолютно высушенном состоянии; перед постановкой изделия на сушку исходное значение определяется через W_0 по формуле $W_{T0} = \frac{W_0}{100 - W_0}$;

$\frac{dM(\tau)}{dt}$ – интенсивность испарения как масса испаряющегося растворителя в единицу времени;

$G = \frac{1}{F} \cdot \frac{dM(\tau)}{dt}$ – скорость испарения растворителя, входящего в состав ЛКМ; определена как интенсивность испарения с единицы поверхности изделия;

F – площадь поверхности изделия, с которой испаряется растворитель; определяется по чертежам или непосредственным измерением.

Далее по тексту статьи величины, относящиеся к поверхностному лаковому покрытию, помечены индексом 1, а относящиеся к глубинным слоям – индексом 2.

Массу растворителя, содержащегося в поверхностном слое лака до начала сушки, M_{H1} , определяют по формуле $M_{H1} = \frac{W_0}{100} M_{Л1} = \frac{W_0}{100} q F_1$, где $M_{Л1}$ – масса ЛКМ, израсходованная на поверхностную лакировку, г; q – установленный экспериментально удельный расход ЛКМ, г/м²; F_1 – площадь открытой поверхности, м².

Массу растворителя, находящегося в глубинных слоях ЛКМ до начала сушки, M_{H2} , определяют как разность между общей массой ЛКМ и массой, расходуемой на поверхностную лакировку, по формуле $M_{H2} = \frac{W_0}{100} M_{Л2} = \frac{W_0}{100} (M_{Л} - M_{Л1})$, где $M_{Л2}$ – масса ЛКМ, находящегося в глубинных слоях, определяется как разность между общим расходом ЛКМ и расходом на поверхностную лакировку.

1.2 Определение скорости испарения

Экспериментальным путём установлено, что отношение скорости испарения растворителя в составе ЛКМ к скорости испарения чистого растворителя G_p можно аппроксимировать формулой

$$\frac{G}{G_p} = 1 - e^{-nW_T} \quad (1)$$

Значение параметра n для каждого ЛКМ находят экспериментальным путём. В табл. 1 приведены значения параметра n для ЛКМ.

В процессе сушки изделия его температура, а вместе с ним и температура ЛКМ изменяются. Как показали проведенные эксперименты, скорость испарения растворителей зависит от температуры. В случае регулярного режима нагревания изделия, что имеет место на практике, изменение среднеобъемной температуры изделия можно определять по формуле $\bar{T} = T_f - (T_f - T_0)e^{-m\tau}$, где \bar{T} – среднеобъемная температура, К; T_f – температура теплоносителя, К; T_0 – начальная температура изделия, К; m – темп нагрева изделия, мин⁻¹; τ – время сушки, мин. Темп нагрева можно определять непосредственным измерением изменения температуры в процессе нагрева изделия или расчётом [6].

Зависимость скорости испарения растворителя от температуры $G_p(\bar{T}, \tau)$ можно определять по полученной в результате исследования формуле [6]

$$G_p(\bar{T}, \tau) = G_{p0} \exp \left[-\frac{r}{R} \left(\frac{1}{\bar{T}} - \frac{1}{T_0} \right) \right], \quad (2)$$

Таблица 1. Значение параметра n , характеризующего снижение скорости испарения растворителя

| Тип ЛКМ | Значение параметра | Тип ЛКМ | Значение параметра |
|--|--------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Пропиточный лак КО-916К | 1,70 | Электроизоляционный лак 1405 | 0,32 |
| Пропиточный лак ФЛ-98 (ксилол+уайт-спирт, 50:50) | 1,50 | Электроизоляционный лак 19902-026 | 0,3 |
| Пропиточный лак ФЛ-98 (ксилол+уайтспирт+бутанол, 37:37:26) | 0,70 | Электроизоляционный лак 129/12 | 0,3 |
| Пропиточный лак ПЭ-933 | 1,20 | Электроизоляционный лак ПЭ-939 | 0,17 |
| Пропиточный лак ПЭ-993 | 0,75 | Электроизоляционный лак ПЭ-955 | 0,16 |
| Пропиточный лак МЛ-92 | 1,12 | Эмаль ПФ-115 | 1,50 |
| Электроизоляционный лак АД-9103 | 0,50 | Эмаль АС-182 | 0,82 |
| Электроизоляционный лак ВЛ-931 | 0,75 | Эмаль меламинная МЛ-12 | 0,70 |
| Электроизоляционный лак АД-9103 (бывший ПАК-1) | 1,00 | Кабельный лак НУ-218 | 0,9 |

где G_{p0} – скорость испарения чистого растворителя при температуре T_0 ; r – удельная теплота испарения, Дж/кг; R – характеристическая газовая постоянная, Дж/кг·К.

В случае применения растворителя лака, состоящего из нескольких компонентов,

уравнение (2) примет вид $G_p(\bar{T}, \tau) = G_{p0} \exp \left[-A \left(\frac{1}{\bar{T}} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$, где $A = \sum_{i=1}^n \frac{g_i r_i}{g_i R_i}$, g_i – массовая

доля i -го компонента лака. Обозначим $f(\tau) = \exp \left[-A \left(\frac{1}{\bar{T}} - \frac{1}{T_0} \right) \right]$. Тогда для глубинных слоёв

ЛКМ

$$G_{p2}(\bar{T}, \tau) = G_{p0} f(\tau). \quad (3)$$

Установлено, что если скорость испарения чистого растворителя и растворителя в составе ЛКМ приводить к одинаковым температурным условиям, взаимосвязь (1) сохраняется.

Скорость испарения растворителей из поверхностного слоя ЛКМ зависит как от изменения температуры, так и от аэродинамических условий сушки. Как доказано в [7], аэродинамические условия сушки для скоростей обдувания изделия v , не превышающих 2 м/с, можно учесть путем введения коэффициента $K_v = 1 + 2,1 \cdot v^{0,7}$. Поэтому скорость испарения растворителей из поверхностного слоя ЛКМ с учётом (3) необходимо определять по формуле

$$G_{p1}(\bar{T}, \tau) = (1 + 2,1 v^{0,7}) G_{p0} f(\tau).$$

1.3 Расчётная модель интенсивности испарения растворителей ЛКМ

Расчётная модель составлена с учётом того, что изменение массы растворителя в слое пропиточного лака за время $d\tau$ равно интенсивности испарения растворителя на данный момент сушки $-\frac{d[M_H - M(\tau)]}{d\tau} = GF$. Разделим обе части уравнения на массу сухого остат-

ка ЛКМ и перейдем к скорости испарения чистого растворителя через относительную скорость испарения (1)

$$-\frac{d}{d\tau}\left(\frac{M_H - M(\tau)}{M_T}\right) = \frac{G_p(\bar{T}, \tau)F}{M_T} \frac{G(\tau)}{G_p(\bar{T}, \tau)}, \quad \frac{G(\tau)}{G_p(\bar{T}, \tau)} = 1 - e^{-nW_T}.$$

Перейдя к относительному (по отношению к сухому остатку) содержанию растворителя и с учётом (1) и (3), получим $-\frac{dW_T(\tau)}{d\tau} = \frac{G_{p0}F}{M_T} f(\tau)(1 - e^{-nW_T})$. Запишем уравнение в виде

$$-\frac{dW_T(\tau)}{d\tau} = Kf(\tau)(1 - e^{-nW_T}), \quad (4)$$

где $K = K_1 = \frac{G_{p0}F_1}{M_{T1}} K_v$ – для поверхностного слоя лака или $K = K_2 = \frac{G_{p0}F_2}{M_{T2}}$ – для глубинных слоёв.

Разделим переменные в уравнении (4) и запишем интегралы в правой и левой частях $\int_{W_H}^{W_T(\tau)} \frac{dW_T(\tau)}{1 - e^{-nW_T(\tau)}} = -K \int_0^\tau f(\tau) d\tau$, где $W_H = \frac{M_H}{M_T}$ – содержание растворителя в ЛКМ по отношению к сухому остатку в начале сушки. Взяв интеграл в левой части уравнения, после подстановки пределов изменения переменной и элементарных преобразований получим

$$\ln\left(e^{nW_T(\tau)} - 1\right) - \ln\left(e^{nW_H} - 1\right) = -Kn \int_0^\tau f(\tau) d\tau, \quad (5)$$

$$e^{nW_T(\tau)} = \left(e^{nW_H} - 1\right) \exp\left(-Kn \int_0^\tau f(\tau) d\tau\right) + 1. \quad (6)$$

Производная по временной переменной τ от обеих частей равенства (6) имеет следующий вид: $ne^{nW_T(\tau)} \frac{dW_T(\tau)}{d\tau} = -nK \left(e^{nW_H} - 1\right) f(\tau) \exp\left(-Kn \int_0^\tau f(\tau) d\tau\right)$. Подставив в левую

часть уравнения выражение $e^{nW_T(\tau)}$ из (6) и выполнив замену вида $\frac{dW_T(\tau)}{d\tau} = \frac{1}{M_T} \frac{dM(\tau)}{d\tau}$,

имеем $\frac{dM(\tau)}{d\tau} = \frac{M_T K \left(e^{nW_H} - 1\right) f(\tau) \exp\left(-Kn \int_0^\tau f(\tau) d\tau\right)}{\left(e^{nW_H} - 1\right) \exp\left(-Kn \int_0^\tau f(\tau) d\tau\right) + 1}$ или получим следующее выражение

для интенсивности испарения:

$$\frac{dM(\tau)}{d\tau} = \frac{M_T K f(\tau)}{1 + \frac{1}{\left(e^{nW_H} - 1\right) \exp\left(-Kn \int_0^\tau f(\tau) d\tau\right)}}. \quad (7)$$

Подставим в формуле (7) соответствующие значения коэффициента K и запишем формулу для суммарной интенсивности испарения, то есть получим общую расчетную модель для определения интенсивности испарения

$$\frac{dM(\tau)}{d\tau} = \frac{M_{T1}K_1f(\tau)}{1 + \frac{1}{\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp\left(-nK_1\int_0^\tau f(\tau)d\tau\right)}} + \frac{M_{T2}K_2f(\tau)}{1 + \frac{1}{\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp\left(-nK_2\int_0^\tau f(\tau)d\tau\right)}}. \quad (8)$$

Формула (8) справедлива как для малотеплоёмких изделий, темп нагревания которых в процессе сушки будет оказывать существенное влияние на скорость испарения растворителей, так и для изделий, темп нагревания которых в процессе сушки незначителен и не оказывает существенного влияния на скорость испарения растворителей. К таким изделиям относятся, в частности, якоря, статоры тепловозных генераторов, двигатели, катушки и др. Как показано в [8], в этом случае в формуле (2) среднеобъёмную температуру изделия \bar{T} можно заменить температурой кипения T_K растворителя. В случае применения смеси растворителей температуру кипения смеси необходимо определять по формуле $T_K = \sum_{i=1}^n g_i T_{Ki}$.

Теперь для смесового растворителя можно функцию $f(\tau)$ заменить постоянной величиной и

записать $D = \exp\left[-A\left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i T_{Ki}} - \frac{1}{T_0}\right)\right]$. Эта величина не зависит от времени. Поэтому, заме-

нив в формуле (8) функцию $f(\tau)$ на D , получим

$$\frac{dM(\tau)}{d\tau} = \frac{M_{T1}K_1D}{1 + \frac{1}{\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp(-nK_1D\tau)}} + \frac{M_{T2}K_2D}{1 + \frac{1}{\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp(-nK_2D\tau)}}.$$

1.4 Определение интегрального выхода растворителя

Для определения интегрального выхода растворителя в процессе сушки воспользуемся уравнением (6). После логарифмирования оно примет следующий вид:

$$nW_T(\tau) = n\frac{M_H - M(\tau)}{M_T} = \ln\left[\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp\left(-nK\int_0^\tau f(\tau)d\tau\right) + 1\right], \text{ откуда получаем окончательно}$$

$$M(\tau) = M_H - \frac{M_T}{n} \ln\left[\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp\left(-nK\int_0^\tau f(\tau)d\tau\right) + 1\right].$$

Интегральный выход растворителей с поверхностных слоёв лака

$$M(\tau)_1 = M_{H1} - \frac{M_{T1}}{n} \ln\left[\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp\left(-nK_1\int_0^\tau f(\tau)d\tau\right) + 1\right]. \quad (9)$$

Интегральный выход растворителя с глубинных слоёв лака

$$M(\tau)_2 = M_{H2} - \frac{M_{T2}}{n} \ln\left[\left(e^{nW_H} - 1\right)\exp\left(-nK_2\int_0^\tau f(\tau)d\tau\right) + 1\right]. \quad (10)$$

1.5 Определение длительности сушки

Исследованиями установлено, что по истечении определённого времени, когда в ЛКМ остаётся 8–12% растворителя (по отношению к сухому остатку), продолжение сушки не приводит к уменьшению массы растворителя в составе ЛКМ. Будем исходить из условия, что окончание сушки определяется минимальным содержанием растворителя 8% от величи-

ны W_H . Воспользуемся уравнением (5), выполнив в нём замену $W_T(\tau) = 0,08W_H$. После элементарных преобразований получим
 – для поверхностного слоя лака

$$\int_0^{\tau_{\max}} f(\tau) d\tau = -\frac{1}{K_1 n} \ln \frac{e^{0,08nW_H} - 1}{e^{nW_H} - 1}, \quad (11)$$

– для глубинных слоёв лака

$$\int_0^{\tau_{\max}} f(\tau) d\tau = -\frac{1}{K_2 n} \ln \frac{e^{0,08nW_H} - 1}{e^{nW_H} - 1}. \quad (12)$$

В правой части уравнений (11) и (12) известны все величины, с помощью которых можно определить верхний предел интегрирования. В процессе взятия интеграла достижение установленного предела или переход через него будет свидетельствовать о выполнении условия $\tau > \tau_{\max}$.

Естественно, что длительность сушки будет определяться временем сушки лака, находящегося в глубинных слоях. Время сушки лака, находящегося на поверхности изделия, полезно знать в случае применения ступенчатого режима вентиляции для определения момента перехода на меньшую производительность вентиляторов.

2 Предложение по уменьшению энергетических затрат на сушку пропитанных лаком электротехнических изделий

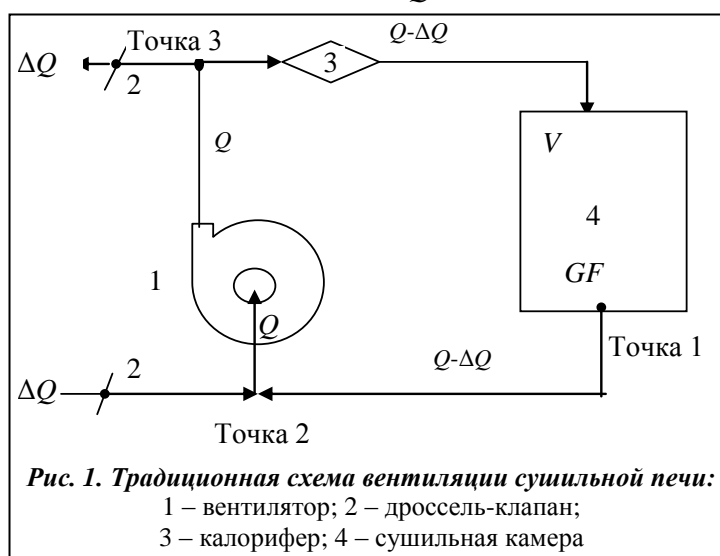
2.1 Изменение конструкции вентиляционных систем сушильных печей

В настоящее время используются сушильные печи, схема вентиляционной системы которых показана на рис. 1. Для определения требуемой по условиям безопасности производительности вентиляторов, то есть обеспечивающей концентрацию паров растворителей в паровоздушной среде, не превышающей предельно допустимой нормы, составим баланс массы паров растворителя в объёме сушильной камеры за бесконечно малый промежуток времени сушки dt .

За время dt концентрация паров в результате испарения растворителя изменится на величину dc , а общая масса растворителя в сушильной камере по этой причине – на величину Vdc . За это же время из камеры будет удалена масса паров растворителя, равная $(Q - \Delta Q)c dt$, где Q – производительность вентилятора, м³/мин; ΔQ – интенсивность проветривания, м³/мин. В результате смешивания воздушных потоков перед вентилятором (точка 2) концентрация паров уменьшится пропорционально отношению $\frac{Q - \Delta Q}{Q}$.

В точке 3 воздушный поток разделяется: часть массы растворителя, равная величине $\frac{Q - \Delta Q}{Q} c \Delta Q dt$, удаляется. Составим материальный баланс $\frac{dM(\tau)}{dt} dt - \frac{Q - \Delta Q}{Q} c \Delta Q dt = Vdc$.

Обозначим отношение $\Delta Q/Q = \alpha$ и после преобразований получим для традиционно применяемой вентиляционной системы обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка вида



$$\frac{dc}{d\tau} + \alpha(1-\alpha)\frac{Q}{V}c = \frac{1}{V}\frac{dM(\tau)}{d\tau}. \quad (13)$$

Решения таких уравнений известны [9]. При начальном условии $c = 0, \tau = 0$ находим зависимость концентрации паров растворителя $c(\tau)_{\text{ТР}}$ в паровоздушной среде

$$c(\tau)_{\text{ТР}} = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} \frac{dM(\theta)}{d\theta} e^{\alpha(1-\alpha)\frac{Q_{\text{ТР}}}{V}(\theta-\tau)} d\theta. \quad (14)$$

Анализ полученного результата показывает, что концентрация паров растворителей зависит от производительности вентилятора и от количества незагрязнённого воздуха, подаваемого в объём печи.

Этой схеме вентиляции присущи два очевидных недостатка: нерациональное использование поступившего незагрязнённого воздуха вследствие удаления части его ещё до поступления в сушильную камеру и неравномерное распределение концентрации паров по отдельным участкам вентиляционной системы.

На рис. 2 представлена схема предлагаемой системы вентиляции, которая отличается от традиционной схемы расположением регулируемого заборного устройства (точка 2). Поместив заборное устройство непосредственно в стенке сушильной камеры печи, мы достигаем равномерного распределения концентрации паров растворителей по всему тракту движения паровоздушной смеси и полного использования незагрязнённого воздуха по прямому назначению.

В предлагаемой системе вентиляции из объёма печи за время $d\tau$ будет удалено $\Delta Qcd\tau$ паров растворителя и материальный баланс будет таким: $\frac{dM(\tau)}{d\tau}d\tau - c\Delta Qd\tau = Vdc$.

После преобразований имеем

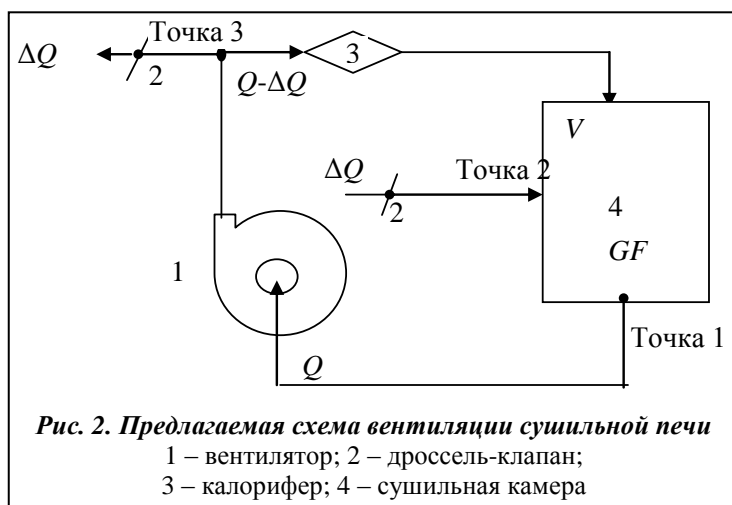
$$\frac{dc}{d\tau} + \frac{\Delta Q}{V} \cdot c = \frac{1}{V} \frac{dM(\tau)}{d\tau}. \quad (15)$$

Интегрируем уравнение (15) для тех же условий, что и уравнение (13), и для предлагаемой схемы вентиляции получаем зависимость концентрации паров растворителей $c(\tau)_{\text{ПР}}$

$$c(\tau)_{\text{ПР}} = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} \frac{dM(\theta)}{d\theta} e^{\frac{\Delta Q}{V}(\theta-\tau)} d\theta. \quad (16)$$

В этой схеме концентрация паров не зависит от производительности вентилятора, а только от интенсивности поступления незагрязнённого воздуха.

Сравним традиционную и предлагаемую системы вентиляции по энергетическим затратам. Для обеспечения равных условий преобразуем уравнение (16), введя в него параметр $\alpha_{\text{ПР}} = \Delta Q/Q_{\text{ПР}}$. Объёмы поступающего и удаляемого воздуха должны быть равны, поэтому в традиционной системе вентиляции $\alpha = 0,5$. Сравнить обе системы вентиляции имеет смысл в равных условиях работы, то есть считать $\alpha_{\text{ПР}} = \alpha_{\text{ТР}} = 0,5$. Тогда для предлагаемой системы вентиляции зависимость концентрации паров растворителя от времени будет иметь следующий вид:



$$c(\tau)_{\text{ПР}} = \frac{1}{V} \int_0^{\tau} \frac{dM(\theta)}{d\theta} e^{\frac{\alpha Q_{\text{ПР}}}{V}(\theta-\tau)} d\theta. \quad (17)$$

Для одинаковых условий сушки в обеих системах вентиляции длительность сушки будет одинакова и, следовательно, будет одинаковой средняя интенсивность испарения растворителей $\left(\frac{dM(\tau)}{d\tau}\right)_{\text{СР}}$. С принятыми допущениями уравнения (14) и (17) можно преобразо-

вать $c(\tau)_{\text{ТР}} = \frac{(1 - e^{-\alpha(1-\alpha)\frac{Q_{\text{ТР}}}{V}\tau})}{\alpha(1-\alpha)Q_{\text{ТР}}} \left(\frac{dM(\tau)}{d\tau}\right)_{\text{СР}}$, $c(\tau)_{\text{ПР}} = \frac{(1 - e^{-\alpha\frac{Q_{\text{ПР}}}{V}\tau})}{\alpha Q_{\text{ПР}}} \left(\frac{dM(\tau)}{d\tau}\right)_{\text{СР}}$. Для равных кон-

центраций имеем отношение $\left(\frac{(1 - e^{-\alpha(1-\alpha)\frac{Q_{\text{ТР}}}{V}\tau})}{(1 - e^{-\alpha\frac{Q_{\text{ПР}}}{V}\tau})}\right) \left(\frac{\alpha Q_{\text{ПР}}}{\alpha(1-\alpha)Q_{\text{ТР}}}\right) = 1$. Отношение в первой скоб-

ке с возрастанием τ стремится к единице. Поэтому в результате получаем $Q_{\text{ПР}} = (1 - \alpha) Q_{\text{ТР}}$. Следовательно, предлагаемая схема вентиляции при прочих равных условиях даёт двойной выигрыш по производительности вентиляторов.

2.2 Учёт изменения интенсивности испарения растворителей ЛКМ в процессе сушки

Применяемая в настоящее время методика наладки конструкции сушильных печей по условиям вентиляции, обеспечивающей взрывобезопасность в процессе сушки, основана на знании времени испарения основной массы растворителей ЛКМ (70-80 %). В рекомендациях [10], а также в [11] значения указанного времени определены для сушки изделий с поверхностной лакировкой. Электротехнические же изделия кроме растворителя ЛКМ на их поверхности имеют большую массу растворителя в глубинных слоях. Начальная скорость испарения растворителей лака, находящегося в глубинных слоях, значительно меньше скорости испарения растворителей с поверхности изделия. Это, естественно, согласно [4,5] и [12,13], приводит к увеличению времени сушки. Наличие же поверхностной лакировки обуславливает большие скорости испарения в начальный период сушки. Интенсивность испарения, определяемая по (8), учитывает особенности испарения растворителей с поверхности изделия и из глубинных слоев лака. Рассчитывая производительность вентилятора, ориентируясь на интенсивность испарения в начальный период сушки, получим весьма неэкономичный режим, что и имеет место в настоящее время.

Приведём один из вариантов расчёта производительности вентиляторов на примере сушки якоря тепловозного генератора ГП 311. На пропитку обмоток и поверхностную лакировку израсходовано 13 кг лака ФЛ-98 с начальным содержанием растворителя $W_0 = 0,49$. В состав растворителя входят: бутиловый спирт 1,6 кг, уайт-спирт 2,35 кг, ксилол 2,35 кг. Требуемые для расчёта параметры получены по результатам проведенного эксперимента на НПО «Электротяжмаш». Результаты расчётов представлены на рис. 3–5.

На рис. 3 показаны графики изменения во времени массы растворителя отдельно с поверхностного слоя и общей массы (9), (10). По графику изменения общей массы можно определить и длительность сушки.

На рис. 4 показаны интенсивности испарения с поверхности изделия, из глубинных слоёв и суммарная интенсивность. Из графиков видно, что растворители, находящиеся на поверхности якоря, испарились полностью в течение первых 20 минут сушки, при этом суммарная интенсивность испарения максимальна. Интенсивность испарения из обмоток существенно меньше, начиная с 20-й минуты, она и определяет содержание паров растворителя в объёме вентиляционной системы. Здесь же показан график суммарной интенсивности испарения (верхняя кривая), которая после двадцатой минуты совпадает с интенсивностью испарения из обмоток якоря.

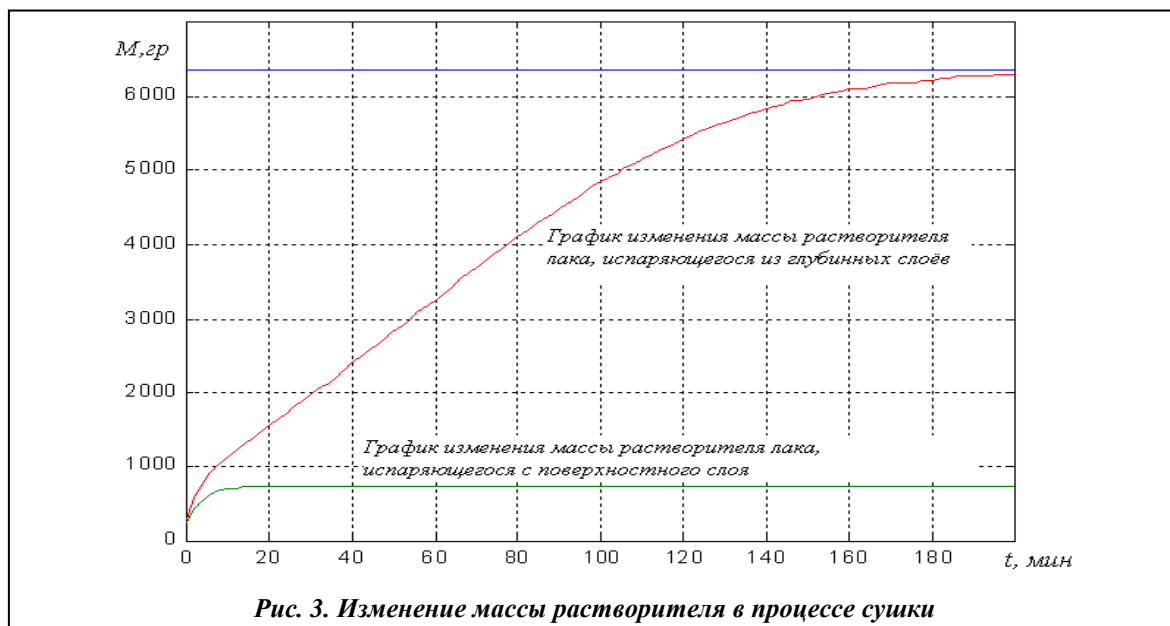


Рис. 3. Изменение массы растворителя в процессе сушки

На рис. 5 представлен график зависимости концентрации паров растворителей в процессе сушки якоря (нижняя кривая) для применяемой в настоящее время системы вентиляции. По известной предельно допустимой концентрации паров растворителя лака ФЛ-98, $c_{ПДВ} = 13 \text{ г/м}^3$, путём последовательного приближения по формуле (14) была определена производительность вентилятора, оказавшаяся равной $30,5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Такая производительность получена по максимальной концентрации $c_{\text{max}} < c_{ПДВ}$, которая образовалась примерно на 5-й минуте от начала сушки. Начиная с двадцатой минуты, такая производительность вентилятора обеспечивает концентрацию, которая меньше половины допустимого значения. На этом же рисунке показана минимально необходимая производительность вентилятора, которая, плавно изменяясь, обеспечивала бы постоянство предельно допустимой концентрации в объёме сушильной камеры.

С целью экономии энергетических затрат рекомендуем применять двухступенчатую регулировку производительности вентилятора (рис. 6).

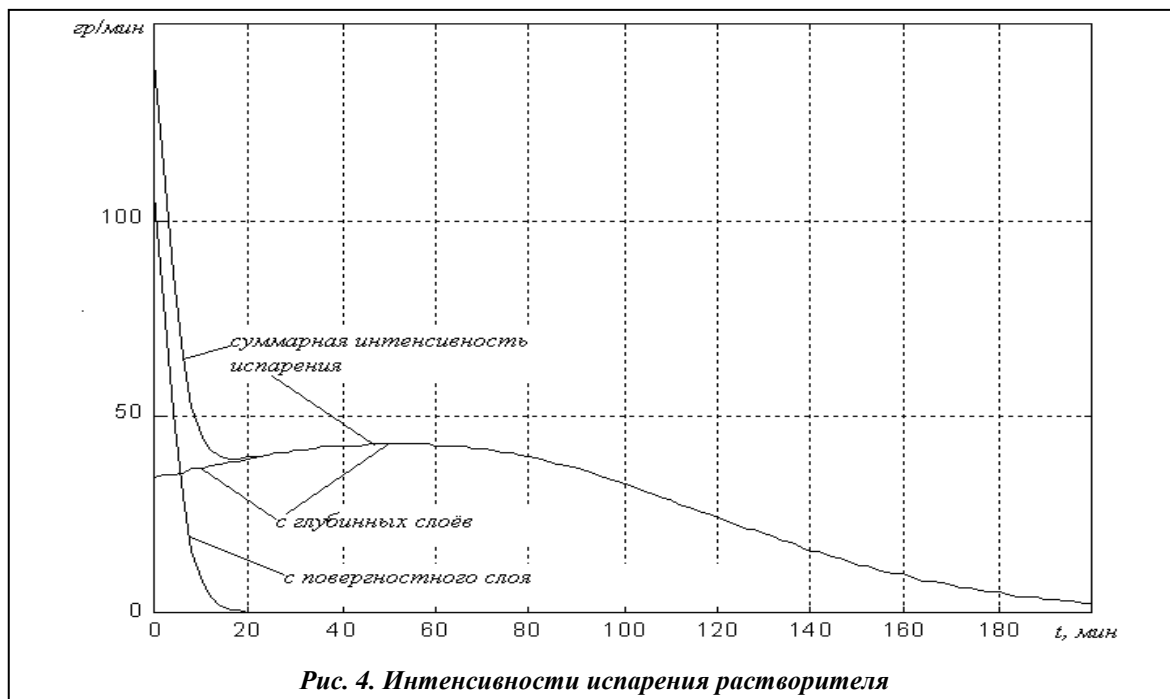
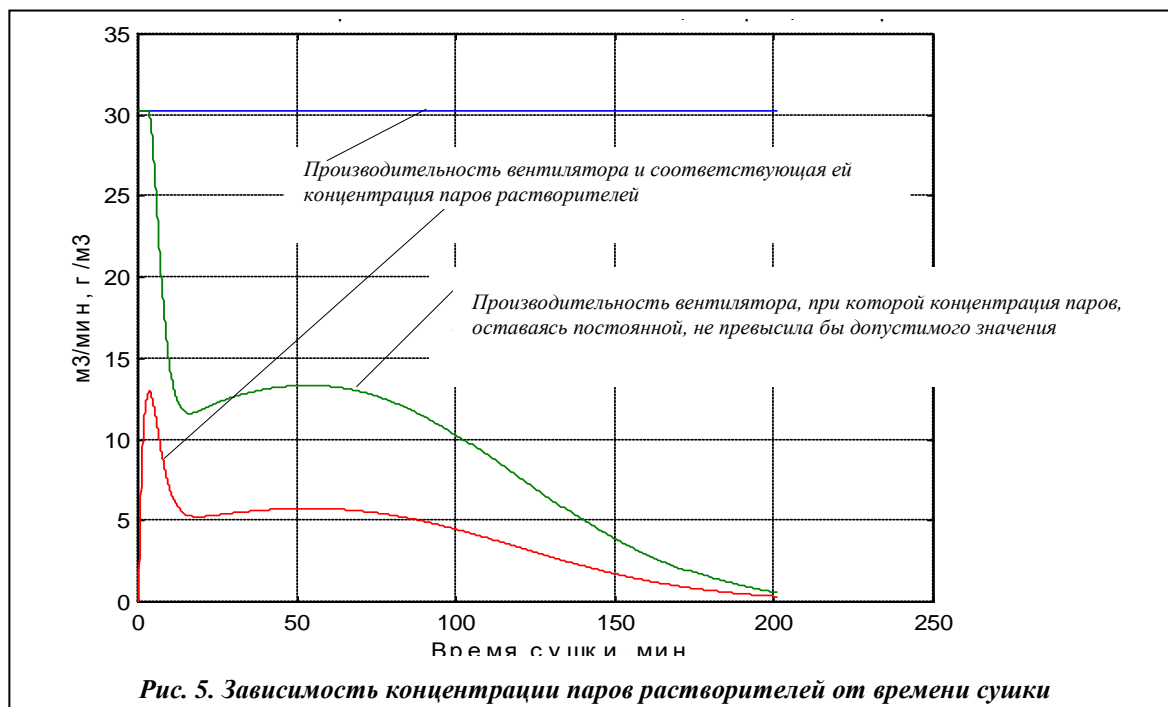
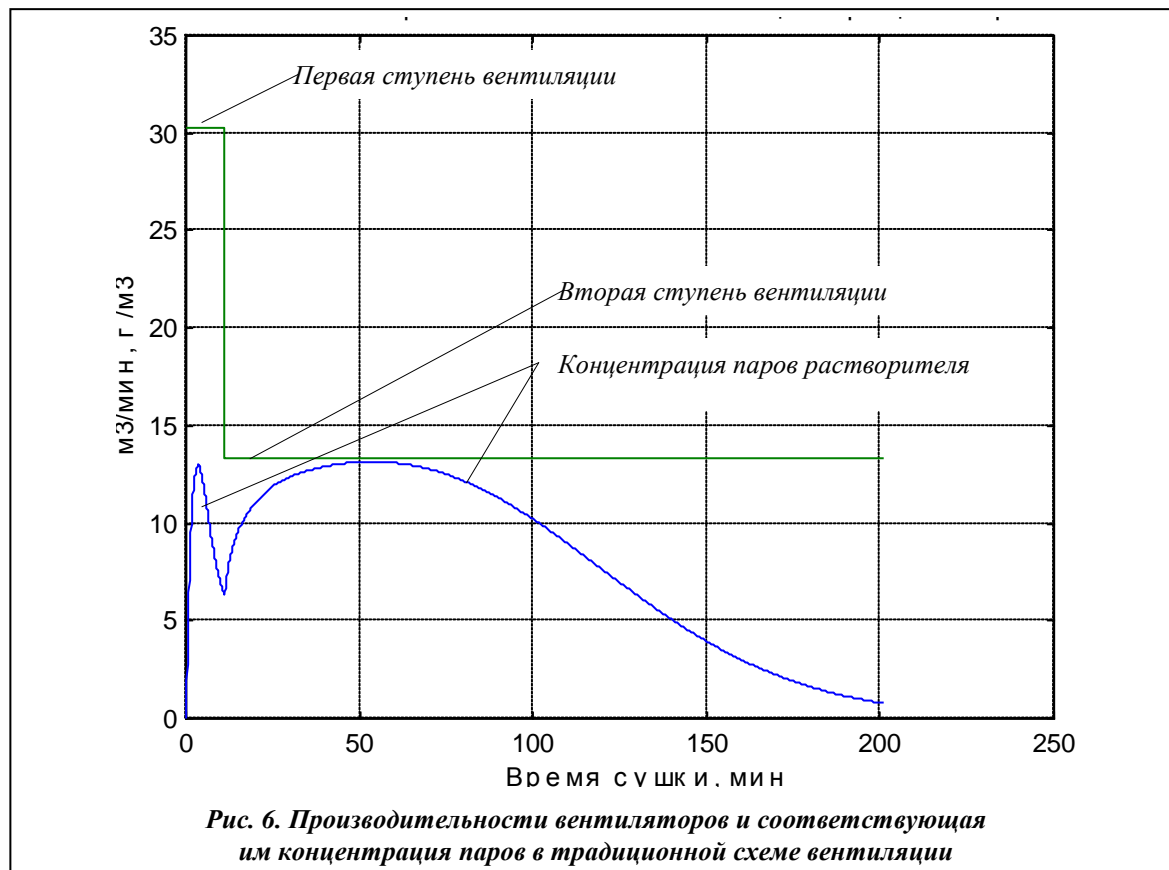


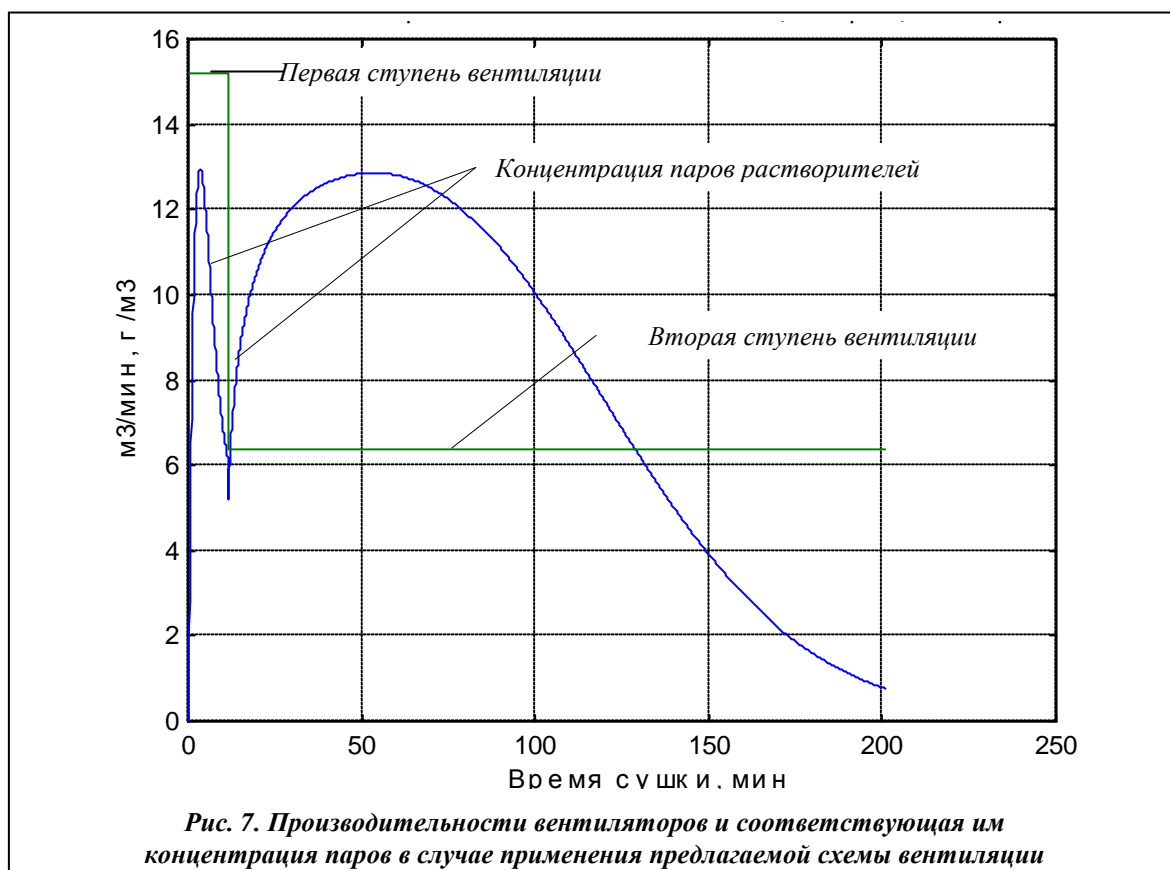
Рис. 4. Интенсивности испарения растворителя



На рис. 6 показаны графики изменения концентрации в случае применения двухступенчатой регулировки для традиционной схемы вентиляции, на рис. 7 – для предлагаемой схемы вентиляции.

Расчёты показывают, что на первой ступени вентиляции требуемая производительность вентилятора в предлагаемой системе вентиляции, определяемая путем последователь-





ных приближений по формуле (16), составляет $15,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ (вместо $30,5 \text{ м}^3/\text{мин}$ для традиционной схемы). На второй ступени производительность вентилятора в предлагаемой схеме составляет $6,4 \text{ м}^3/\text{мин}$, а в традиционной $14 \text{ м}^3/\text{мин}$. В табл. 2 представлены результаты расчетов необходимых объемов воздуха для различных режимов вентиляции, где сравниваются объемы прокачиваемого воздуха за время сушки, равное 200 минут для различных режимов вентиляции с учётом перехода на вторую ступень через 11 минут сушки.

Таблица 2. Сравнение объёмов прокачиваемого воздуха

| Схема вентиляции | Прокачиваемые объёмы воздуха, м^3 | | | Относительный выигрыш, разы |
|------------------------------|--|----------------------------|----------|-----------------------------|
| | Первая ступень | Вторая ступень | Суммарно | |
| Традиционная одноступенчатая | $30,5 \times 11 = 335,5$ | $30,5 \times 189 = 5764,5$ | 6100 | 2 |
| Традиционная двухступенчатая | $30,5 \times 11 = 335,5$ | $14 \times 189 = 2646$ | 2981,5 | |
| Традиционная одноступенчатая | $30,5 \times 11 = 335,5$ | $30,5 \times 189 = 5764,5$ | 6100 | 1,97 |
| Предлагаемая одноступенчатая | $15,5 \times 11 = 170,5$ | $15,5 \times 189 = 2929,5$ | 3100 | |
| Традиционная двухступенчатая | $30,5 \times 11 = 335,5$ | $14 \times 189 = 2646$ | 2981,5 | 2,2 |
| Предлагаемая двухступенчатая | $15,5 \times 11 = 170,5$ | $6,4 \times 189 = 1209,6$ | 1380,1 | |
| Традиционная одноступенчатая | $30,5 \times 11 = 335,5$ | $30,5 \times 189 = 5764,5$ | 6100 | 4,4 |
| Предлагаемая двухступенчатая | $15,5 \times 11 = 170,5$ | $6,4 \times 189 = 1209,6$ | 1380,1 | |

Необходимо также иметь в виду, что с уменьшением объёмов прокачиваемого воздуха будет соответственно уменьшаться объём воздуха, поступающего в калорифер на подогрев.

3. Практическая реализация вентиляционной системы со ступенчатой регулировкой объема подаваемого воздуха в сушильную камеру печи

В НПО «Электротяжмаш» была создана сушильная электропечь типа Н70044А, в которой применена ступенчатая регулировка объема поступающего в печь воздуха и поступления его непосредственно в сушильную камеру. Печь состоит из четырех сушильных камер, каждая из которых имеет отдельный калорифер и автономную вентиляционную систему. Конструкция сушильной камеры представлена на рис. 8. Изделие устанавливают на решетчатую раму, которую выкатывают из сушильной камеры вместе с дверью камеры. Система вентиляции снабжена искробезопасным вентилятором с трехскоростным электроприводом. В зависимости от производительности вентилятора имеет следующие режимы, м³/час: минимум 800, максимум 3000, в режиме продувки 6000.

Заключение

В данной статье мы не рассматривали экономию электроэнергии в калориферах в связи с уменьшением объёма прокачиваемого через него воздуха. Решение этой проблемы возможно осуществить путём уменьшения мощности нагревательных элементов калорифера. Однако при этом возникает проблема пожарной безопасности процесса нагрева воздуха. Температура поверхности нагревательных элементов калорифера не должна превышать допустимой, значение которой не одинаково для разных растворителей и зависит от концентрации паров растворителей в воздухе. Кроме этого, температура поверхности нагревательных элементов зависит от скорости движения воздуха и конфигурации нагревательных элементов. С учётом сказанного задача оказывается не такой простой и требует решения.

Необходимо также отметить, что время нахождения изделия в сушильной камере не ограничивается временем, определяемым по формуле (12). Лаковая плёнка должна затвердеть. Процесс затвердевания идёт при определённой температуре и может длиться значительно дольше, чем длительность сушки. Это, в частности, относится к теплоинерционным изделиям. По технологии температура запечки изоляционных лаков составляет сотни градусов. При малых темпах нагрева изделия такая температура может быть достигнута через время, значительно превышающее необходимое для практически полного удаления растворителей из лака. После окончания собственно сушки подачу свежего воздуха в сушильную камеру печи можно свести до минимума, так как пары растворителей в воздухе отсутствуют и, естественно, уменьшить расход энергии на подогрев теплоносителя в калорифере. Этот отрезок технологического цикла изготовления изделия заканчивается измерением характеристик электроизолирующих

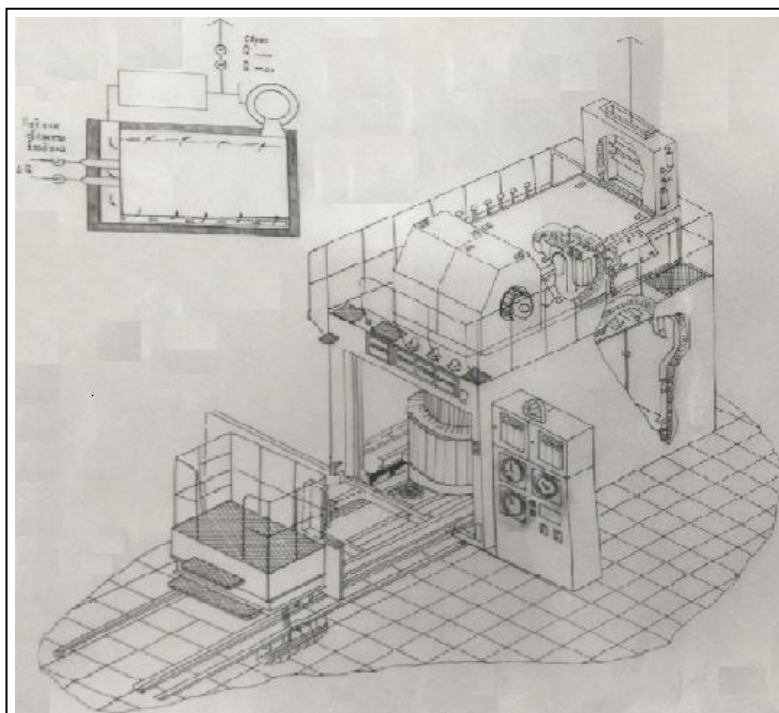


Рис. 8. Сушильная электропечь

свойств лаковой плёнки и, если они не удовлетворяют требованиям, изделие возвращают на повторную пропитку.

В качестве информации укажем, что полученная расчетная формула (9), а также данные источников [4, 5, 12, 13] подтверждают принципиальное отличие сушки изделий с поверхностной лакировкой от сушки электроизоляционных ЛКМ в обмотках электротехнических изделий. Это отличие было учтено в новых «Правилах и нормах техники безопасности, пожарной безопасности и производственной санитарии для окрасочных цехов», введенных в действие в 1977 году.

Литература

1. Барэмбо К. Н. Сушка, пропитка и компаундирование обмоток электрических машин / К. Н. Барэмбо, Л. М. Бернштейн. – М.: Энергия, 1967. – 84 с.
2. Шаров В. К. О сушке изоляции обмоток электрических машин / В. К. Шаров // Электротехника. – 1971. – № 7. – С. 29–1.
3. Бровер Ю. М. Проектирование и эксплуатация электропечей периодического действия для сушки после пропитки электротехнических изделий / Ю. М. Бровер, О. Г. Мусиенко, В. К. Шаров // Электротехника. – 1981. – № 7. – С. 10–13.
4. Шаров В. К. Опыт создания автоматизированных печей и исследование пожарной опасности процессов сушки лакокрасочных покрытий обмоток электромашин / В. К. Шаров // Прогрессивные методы сушки лакокрасочных покрытий : Материалы семинара. Ленинград. Дома науч.-техн. пропаганды. – Л.; 1974. – С. 38–46.
5. Волощук А. Я. Экспериментальное исследование взрывопожарной опасности процесса сушки пропитанных лаком якорей тепловозных генераторов / В. И. Сидорчук, В. К. Шаров // Тепло- и массообмен в технологических процессах производств и при пожарах: Сб. науч. тр.– М.: ВИПТШ МВД СССР, 1983 – С. 43–55.
6. Отчёт по научно-исследовательской работе «Разработка норм и правил пожарной безопасности при проектировании и эксплуатации печей для сушки электроизделий после пропитки. МВД СССР ВИПТШ, 1989 г.
7. Эльтерман Е. М. Изучение скорости выделения растворителей из лакокрасочных покрытий / Е. М. Эльтерман // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1973. – № 3. – С. 84–86.
8. Сидорук В. И. Влияние выделения растворителей пропиточных лаков на взрывопожаробезопасность процессов сушки / В. И. Сидорчук // Лакокрасочные материалы и их применение. – 1983. – № 6. – С. 52.
9. Степанов В. В. Курс дифференциальных уравнений / В. В. Степанов. – М.: Физматгиз, 1959. – 468 с.
10. Правила и нормы техники безопасности, пожарной безопасности и производственной санитарии для окрасочных цехов. – М.: Машиностроение, 1977. – 20 с.
11. Лакокрасочные покрытия в машиностроении: Справочник. – М.: Машиностроение, 1974. – 576 с.
12. Шаров В. К. Разработка методов расчета пожаровзрывобезопасности новых конструкций электропечей для сушки обмоток якорей электромашин: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1986. – 16 с.
13. Андреев В. В. Оценка пожарной опасности процесса сушки электротехнических изделий после их пропитки в лаках с учетом нестационарности процесса и конфигурации изделий: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 1991. – 16 с.

Поступила в редакцию
6.12.11