

УДК 321.315

Т.В. Костыгова¹, А.А. Путилова¹, Д.Р. Минулин²

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия;

²ООО «Камский кабель», Пермь, Россия

АНАЛИЗ РАБОТЫ ЭМАЛЬ-АГРЕГАТА MATE SV 70-224/2 ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕЧИ

С развитием технического прогресса необходимость в обмоточных проводах возросла. Особо востребованы провода с эмалевой изоляцией, так как они имеют наименьшую толщину изоляции и достаточно высокие механические и электрические параметры, а также электроизоляционные характеристики, которые сохраняются даже в условиях воздействия повышенных температур и влажности. В последнее время наибольшее внимание уделяется производству эмальпроводов с повышенным температурным индексом. Технологический процесс эмалирования позволяет получить провод с диаметром в диапазонах от 0,012 до 3,0 мм. Сам процесс происходит на современном оборудовании, которое является сложным комплексным устройством и делится на два типа: горизонтальные и вертикальные эмаль-агрегаты. Эмалирование можно подразделить на несколько этапов: волочение проволоки и отжиг, наложение эмаль-лака и термообработка покрытия, которая происходит в эмаль-печи агрегата. Принцип действия эмаль-печи основан на рециркуляции нагретых потоков воздуха. Для получения качественной изоляции необходимо правильно рассчитать скорость эмалирования, которая, в свою очередь, зависит от таких параметров, как: скорость воздушного потока внутри печи и температура в эмаль-печи. Цель работы заключалась в определении оптимальной скорости эмалирования для вертикального эмаль-агрегата MATE SV 70-224/2. Проводился анализ влияния скорости воздушного потока в диапазоне от 0,5 до 3,0 м/с и изменения температуры на катализаторе от 500 до 750 °С. После произведённых расчётов были составлены графики и диаграммы зависимости скорости эмалирования от скорости воздуха и от температуры в эмаль-печи.

Ключевые слова: эмалирование, эмаль-агрегат, эмаль-печь, обмоточные провода, скорость, воздушный поток, катализатор, термопара, температура.

T.V. Kostygova¹, A.A. Putilova¹, D.R. Minulin²

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²LLC "Kamsky cable", Perm, Russian Federation

ANALYSIS OF THE MATE SV 70-224 / 2 ENAMELAGREGATE WORKING WITH THE CHANGING OF THE TECHNOLOGICAL CHARACTERISTIC OF THE ENAMELLING-OVEN

With the development of technical progress, the need for winding wires has increased. The wires with enamel insulation are particularly in demand, since they have the smallest thickness of insulation and sufficiently high mechanical and electrical parameters, as well as electrical insulation charac-

teristics, which are preserved even under conditions of high temperatures and humidity. Recently, the greatest attention is paid to the production of enamel wires with an elevated temperature index. The technological process of enameling makes it possible to obtain a wire with a diameter in the ranges from 0.012 to 3.0 mm. The process itself takes place on modern equipment, which is a complex device, and is divided into two types: horizontal and vertical enamel aggregates. Enamelling can be divided into several steps: wire-drawing and annealing, wire enamel application and heat treatment of the coating, which occurs in the enamelling-oven of the unit. The principle of the enamel machining is based on the recirculation of heated air flows. To obtain high-quality insulation, it is necessary to correctly calculate the enamelling speed, which, in turn, depends on parameters such as airflow velocity inside the oven and temperature in the enamelling-oven. The aim of the work was to determine the optimum enamelling speed for the vertical enamel plant MATE SV 70-224 / 2. The effect of airflow velocity in the range from 0.5 to 3.0 m/s was analyzed, and the temperature changes on the catalyst from 500 to 750 °C. After the calculations, graphs and diagrams of the dependence of the enamelling rate on air speed and temperature in the enamelling-oven.

Keywords: enameling, enamel aggregate, enamelling-oven, winding wires, speed, air flow, catalyst, thermocouple, temperature.

Введение. На сегодняшний день производство различных электрических машин, аппаратов и приборов приводит к необходимости увеличения выпуска обмоточных проводов, а в первую очередь проводов с эмалевой изоляцией. Данный вид проводов является наиболее прогрессивной группой, так как имеет более тонкую изоляцию, что позволяет повысить мощность электрических машин и аппаратов, снизить их габаритные размеры при сохранении существующих параметров, помимо этого эмалевая изоляция обладает хорошими электрическими и механическими параметрами, повышенной нагревостойкостью и более высокой стойкостью к действию влаги [1, 2].

1. Процесс эмалирования, агрегаты для получения проводов с эмалевой изоляцией. Обмоточные провода с эмалевой изоляцией производятся путём послойного нанесения жидкого лака на проволоку с последующей термообработкой ее в печи при температуре 500...600 °C, в результате которой образуется изоляционное покрытие [3]. Эмалирование проволоки происходит на современном оборудовании.

Эмаль-агрегаты представляют собой сложные комплексные устройства, принцип действия которых заключается в следующем: проволока с отдающих устройств поступает в волочильную приставку и в печь отжига, затем в ванну для нанесения слоя лака и в печь для тепловой обработки этого слоя лака (эмаль-печь), где происходит процесс удаления растворителя и пленкообразования. Как правило, эмаль-агрегаты многоходовые, т.е. одновременно на них эмалируется несколько проволок. Каждая проволока проходит через ванну с лаком и эмаль-печь несколько раз (проходов). По выходу из эмаль-печи про-

вод охлаждается в камере охлаждения. После последнего прохода готовый провод через тяговое устройство поступает на приемные катушки. Эмали-агрегаты делятся на горизонтальные и вертикальные.

Вертикальный агрегат MATE SV70-224/2 предназначен для эмалирования круглых медных проводов диаметром от 0,70 до 2,24 мм [4, 5]. Его технические характеристики представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технические характеристики эмали-агрегата Mate SV 70-224/2

Наименование характеристики	Величина характеристики
Диаметр изолируемой жилы, мм	0,710-2,240
Число линий	4
Максимальное количество проходов проволоки через лак одного хода	20 (4+12+4)
Количество лаковых баков	5 (1 общий)
Количество печей отжига (на 1 линию)	1
Количество эмальпечей (на 1 линию)	1
Электрическая мощность, кВт, общая	450
Максимальный диаметр подтяжки, мм	3,5
$V \times D$ (производительность)	100
Тип отдающих катушек, D щеки, мм	560, 630, корзины
Тип приемных катушек, D щеки, мм	250,355, 250/400,315/500, 400/630
Габариты оборудования (длина, ширина, высота), м	28,5×6,36×16,67
Масса (максимальная нагрузка на пол), т	15
Стоимость, евро	850 000

Одна линия эмали-агрегата состоит из следующих узлов:

- отдающие устройство (1 шт.);
- волоочильная приставка (1 шт.);
- устройство очистки проволоки (1 шт.);
- печь отжига перед эмалированием (1 шт.);
- лаковый узел (1 шт.);
- эмаль-печь (1 шт.);
- короб охлаждения (2 шт.);
- приемное устройство (1 шт.);
- система направляющих и поворотных роликов;
- центральный пульт управления (1 шт. общий для 2 линий эмали-агрегата);
- система вентиляции.

Технологическая цепочка изготовления эмалированных проводов на данном агрегате представлена на рис. 1.

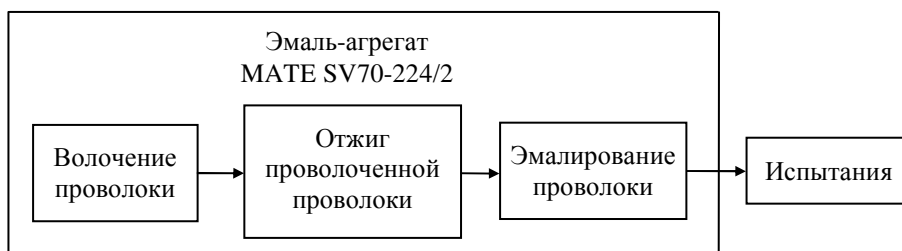


Рис. 1. Технологическая цепочка изготовления эмалированных проводов

Процесс эмалирования можно подразделить на несколько этапов: волочение проволоки и отжиг, наложение эмаль-лака и термообработка покрытия, которая происходит в эмаль-печи агрегата. Такой несложный на первый взгляд процесс на самом деле предьявляет ряд специфических и часто противоречивых требований к материалу, образующему эмаль-пленку. Эти требования удобно разделить на две группы: требования, обусловленные особенностями работы узла нанесения, и требования, обусловленные условиями термообработки [6].

Печь представляет собой туннель, внутрь которого поступает из устройства нанесения проволока, покрытая эмаль-лаком. Камера печи имеет две зоны: первая зона – от входа проволоки до уровня устройства отсоса газов, в данной зоне происходит испарение растворителя за счёт высокой температуры, и вторая зона, которая начинается от уровня отсоса газов и заканчивается на выходе проволоки после поликонденсации изоляции. Вторая зона является конечным пунктом, в ней происходит процесс образования плёнки [7]. Диаграмма рециркуляции эмаль-печи представлена на рис. 2.

На рис. 2 показано подробное устройство эмаль-печи, цифрами указаны основные её компоненты: 1 – устройство нанесения; 2 – узел предварительного нагрева; 3 – рециркуляционный вентилятор; 4 – узел нагрева; 5 – катализатор; 6 – узел перегрева; 7 – система охлаждения; 8 – предварительный отжиг; 9 – отжиг; S – выводная труба.

Принцип действия печи основан на том, что воздух, предварительно нагретый в одноимённом узле до 380 °С, вытягивается рециркуляционным вентилятором, затем он проходит через узел нагрева, ка-

тализатор и узел перегрева, где происходит сгорание отходящих газов, температура катализатора варьируется от 700 до 750 °С, а в области узла перегрева достигает 682 °С. Далее часть воздушного потока направляется в выводную трубу, а оставшаяся часть возвращается в камеру печи через трубу Вентури, которая функционирует на одноименном физическом эффекте, за счет этого эффекта происходит разрежение воздуха и тем самым поддув происходит внутрь печи.

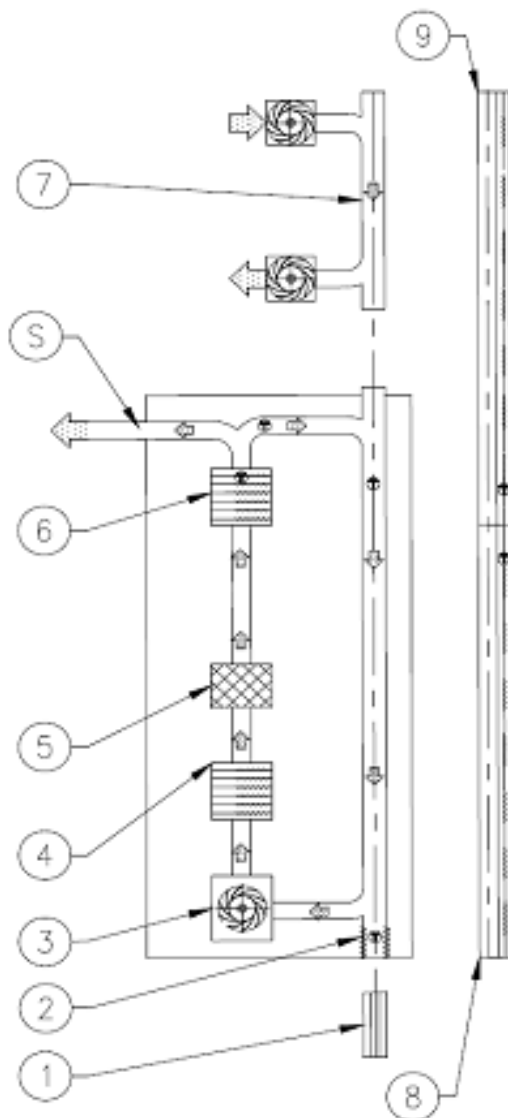


Рис. 2. Диаграмма рециркуляции эмали-печи

Над устройством располагается подпор, который не даёт воздуху полностью покинуть пространство печи [8–10].

2. Результаты изменения технологических параметров печи.

Очень важно определить необходимую скорость эмалирования, которая зависит от температуры и скорости воздуха в эмаль-печи. Были проведены расчеты, в которых учитывались изменения скорости воздушного потока и температурной кривой внутри печи, а также и их влияние на процесс плёнообразования.

Температурное поле по высоте эмаль-печи МАТЕ SV 70-224/2 изображено на рис. 3.

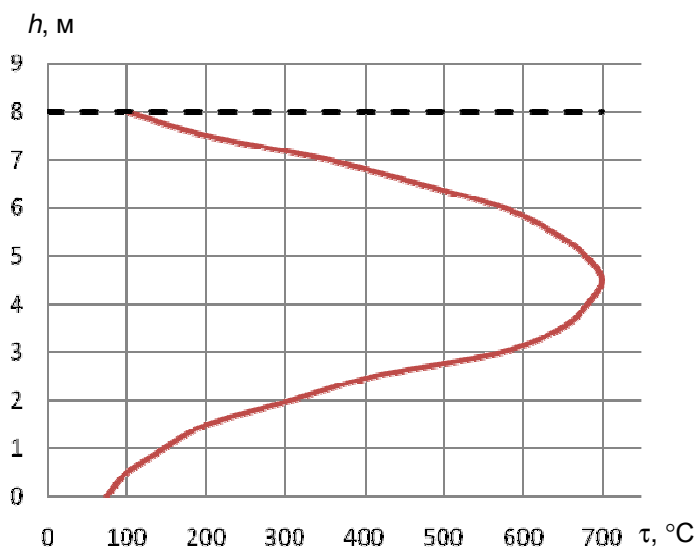


Рис. 3. Распределение температуры термопары по высоте печи эмаль-агрегата

Для определения максимальной (V_{\max}), минимальной (V_{\min}) и оптимальной ($V_{\text{опт}}$) скорости эмалирования необходимо вычислить зависимость средней степени плёнообразования ($A_{\text{ср}}$), степени пленкообразования по последнему проходу (A_n) и средней степени деструкции по слоям ($B_{\text{ср}}$) от скорости эмалирования. Необходимо учитывать, что для получения качественной изоляции должны выполняться следующие условия: $A_{\text{ср}} \geq 0,7$, $A_n \geq 0,5$, а $B_{\text{ср}} \leq 0,15$. Результаты расчётов представлены в табл. 2, а график зависимости $A_{\text{ср}}$, A_n , $B_{\text{ср}}$ от $V_{\text{эмалир}}$ представлен на рис. 4.

Таблица 2

Результаты расчётов

$T_{\text{катализ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$V_{\text{эмалир}}, \text{ м/мин}$	$A_{\text{ср}}$	A_n	$B_{\text{ср}}$
700	94	1	1	0,2
	98	1	1	0,15
	102	1	1	0,11
	106	1	0,99	0,08
	110	1	0,98	0,06
	114	1	0,95	0,04
	118	0,99	0,89	0,03
	122	0,98	0,82	0,02
	126	0,97	0,74	0,02
	130	0,95	0,65	0,01
	134	0,93	0,56	0,01
	138	0,9	0,48	0,01
	142	0,87	0,41	0,01
	146	0,82	0,34	0,01
	150	0,77	0,29	0
	154	0,71	0,24	0
158	0,65	0,21	0	

$V_{\text{max}} = 136, V_{\text{min}} = 98, V_{\text{опт}} = 129$

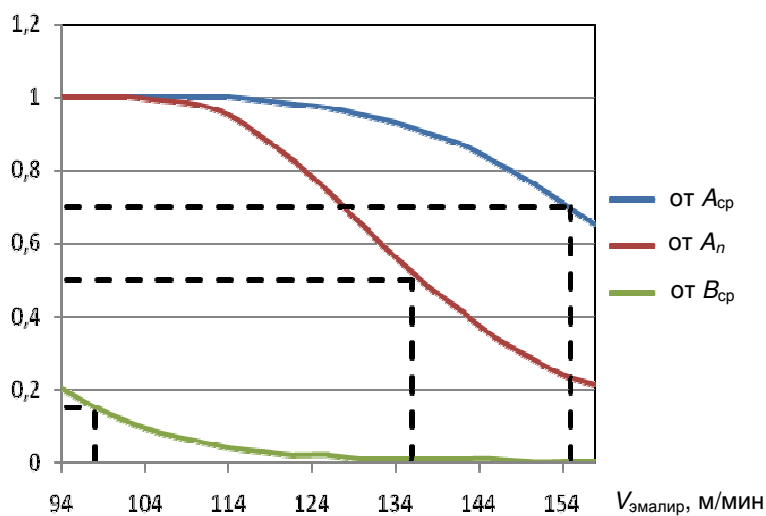


Рис. 4. График зависимости $A_{\text{ср}}, A_n, B_{\text{ср}}$ от $V_{\text{эмалир}}$

Для выбора оптимально-приемлемой скорости эмалирования был проведён анализ зависимости скорости эмалирования от изменения температуры внутри печи. Были составлены графики температуры термопары, где температура на катализаторе варьировалась от 500 до 750 °С. Графики распределения температуры термопар изображены на рис. 5 [11–14].

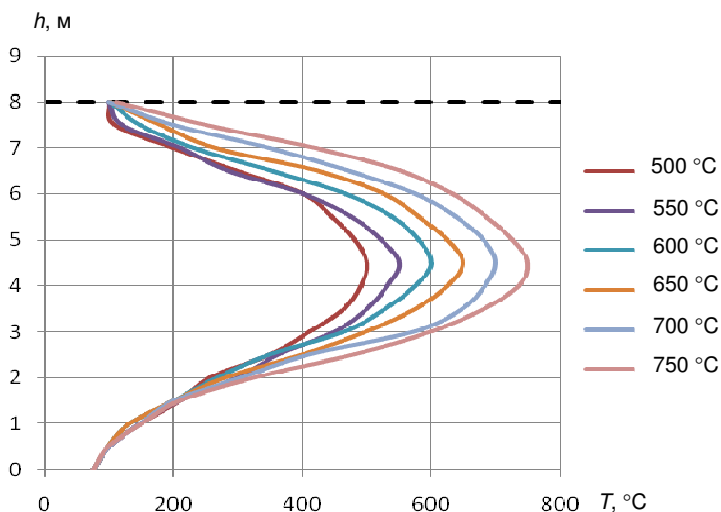


Рис. 5. Распределение температуры термопары при изменении температуры на катализаторе от 500 до 750 °С

Изменение температуры и скорости согласно расчётам представлено в табл. 3. По результатам можно сделать вывод, что оптимальная скорость эмалирования увеличивается с увеличением температуры катализатора. График анализа представлен на рис. 6.

Таблица 3

Зависимость скорости эмалирования от температуры катализатора

$T_{\text{катализ}}, \text{ }^\circ\text{C}$	$V, \text{ м/мин}$
500	$V_{\text{max}} = 62; V_{\text{min}} = 42; V_{\text{опт}} = 59$
550	$V_{\text{max}} = 73; V_{\text{min}} = 50; V_{\text{опт}} = 69$
600	$V_{\text{max}} = 89; V_{\text{min}} = 62; V_{\text{опт}} = 85$
650	$V_{\text{max}} = 110; V_{\text{min}} = 78; V_{\text{опт}} = 104$
700	$V_{\text{max}} = 136; V_{\text{min}} = 98; V_{\text{опт}} = 129$
750	$V_{\text{max}} = 165; V_{\text{min}} = 120; V_{\text{опт}} = 157$

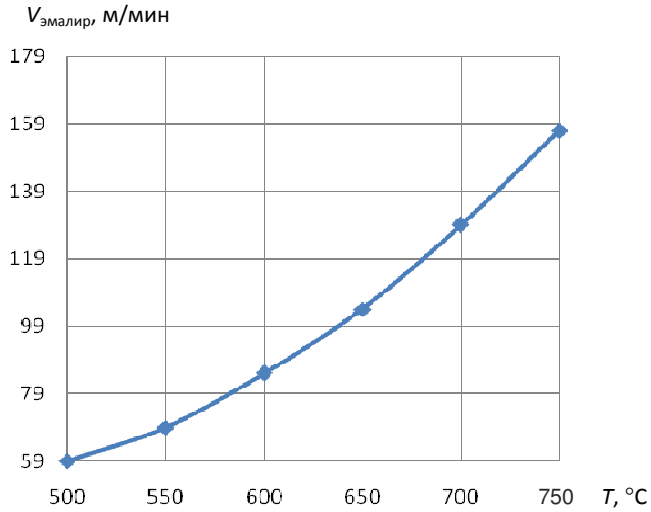


Рис. 6. Зависимость скорости эмалирования от температуры

Проведены расчёты, которые показывали влияние скорости воздушного потока в эмали-печи на скорость эмалирования. Изначально скорость воздуха на высоте 1 м была взята равной 1,3 м/с. Скорость воздуха изменялась в диапазоне от 0,5 до 3,0 м/с. Результаты расчёта представлены в табл. 4. Также составлены графики зависимости $V_{\text{возд}}$ от $V_{\text{эмалир}}$. График зависимости в диапазоне от 0,5 до 3,0 м/с представлен на рис. 7.

Таблица 4

Изменение скорости воздуха
в диапазонах от 0,5 до 3,0 м/с

$V_{\text{возд}}$, м/с	$V_{\text{эмалир}}$, м/МИН
0,50	106
0,75	115
1,0	122
1,25	128
1,30	129
1,50	134
1,75	140
2,0	144
2,25	149
2,50	154
2,75	159
3	162

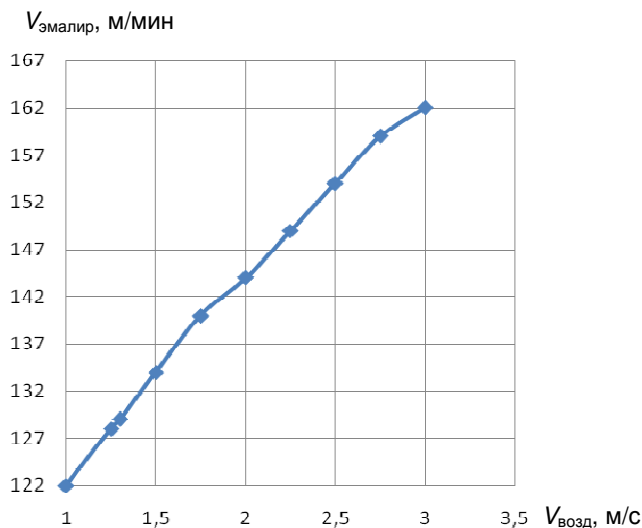


Рис. 7. Зависимость $V_{\text{возд}}$ от $V_{\text{эмалир}}$ в диапазоне от 0,5 до 3,0 м/с

Выводы. С увеличением температуры на катализаторе скорость эмалирования возрастает, так как температуры в первой и второй зонах становятся также выше, и быстрее происходят процессы удаления растворителя и плёнообразования. С увеличением скорости воздушного потока тепло интенсивнее переносится по зонам и температура в эмаль-печи возрастает, поэтому скорость эмалирования также растёт.

Библиографический список

1. Пешков И.Б. Обмоточные провода: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 416 с.
2. Костыгова Т.В., Курочкина Ю.П. Расчёт технологического режима эмалирования и оценка качества изоляции по температурной кривой $\text{tg } \delta$ // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2014. – № 1(9). – С. 93–103.
3. Петров А.В., Пыткина Ю.М., Такеева Б.М. Опыт применения калибров для эмалирования круглой проволоки // Известия Томск. политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов. – 2011. – № 2. – С. 40–43.
4. Newtech S.r.l. Сведения о сертификате соответствия требованиям технических регламентов [Электронный ресурс]. – URL: <http://webportalsrv.gost.ru/portal/certiftr/CERTIFTRPUBLIC.nsf/b1d4e6276fe6ac59c32575d0004cd567/11cda198bdb81a0c44257a32003f4b99?OpenDocument> (дата обращения: 19.05.2017).

5. Способ изготовления эмалированных проводов и устройство для его осуществления / Г.В. Смирнов, Г.Г. Зиновьев, К.И. Ковальский, С.А. Волков [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.findpatent.ru/patent/204/2047231.html> (дата обращения: 19.05.2017).

6. Большая энциклопедия нефти и газа. Процесс эмалирования [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ngpedia.ru/id344385p1.html> (дата обращения: 19.05.2017).

7. Дряхлов А.С., Лимаренко С.В., Финтиктиков В.А. Некоторые особенности оценки эффективности каталитического дожигания растворителей в эмальагрегатах с рециклом газового потока // Наука и техника. – 2005. – № 6. – С. 12–17.

8. Петров А.В. Определение тепловых режимов эмалирования проводов [Электронный ресурс] // Наука и техника. – 2012. – № 2. – URL: <http://www.kp-info.ru/images/File/2012%202%203-7.pdf> (дата обращения: 19.05.2017).

9. Костыгова Т.В. Технология производства проводов. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2010. – 69 с.

10. Борщевский С.Г., Холодный С.Д., Кассихин Л.И. Исследование и расчёт плёнообразования при эмалировании / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1987. (Деп. в Информэлектро. № 727-ЭТ).

11. Борщевский С.Г., Кассихин Л.И. Расчёт оптимальной скорости эмалирования на стадии удаления растворителя / Перм. политехн. ин-т. – Пермь, 1986. (Деп. в Информэлектро. № 313-ЭТ).

12. Соловьёв С.В. Тепловой расчет процесса эмалирования проводов по заданной кривой нагрева [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.dslib.net/elektro-stancii/teplovoj-raschet-processa-jemalirovanija-provodov-po-zadannoj-krivoj-nagreva.html> (дата обращения: 19.05.2017).

13. Эволюция технологического оборудования для производства эмалированных проводов [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ruscable.ru/news/2013/02/12/Evolutsiya_tehnologicheskogo_oborudovaniya_dlya_pr/ (дата обращения: 19.05.2017).

14. Обмоточные провода с эмалевой, волокнистой и оксидной изоляцией [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.tehnoarticles.ru/lumuniy/21.html> (дата обращения: 19.05.2017).

References

1. Peshkov I.B. *Obmotochnye provoda* [Winding wires]. 2nd ed. Moscow: Energoatomizdat, 1995. 416 p.
2. Kostygova T.V., Kurochkina Iu.P. Raschet tekhnologicheskogo rezhima emalirovaniia i otsenka kachestva izoliatsii po temperaturnoi krivoi $tg \delta$ [Enamel covering operating practice calculations and insulation quality monitoring according to the temperature profile $tg \delta$]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 1(9), pp. 93-103.
3. Petrov A.V., Pytkina Iu.M., Takeeva B.M. Opyt primeneniia kalibrov dlia emalirovaniia krugloi provoloki [The experience of using calibres for enameling a round wire]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2011, no. 2, pp. 40-43.
4. Newtech S.r.I. Svedeniia o sertifikate sootvetstviia trebovaniiam tekhnicheskikh reglamentov [Newtech S.r.I. Information about certificate of conformity], available at: <http://webportalsrv.gost.ru/portal/certiftr/CERTIFTRPUBLIC.nsf/b1d4e6276fe6ac59c32575d0004cd567/11cda198bd b81a0c44257a32003f4b99?OpenDocument> (accessed 19 May 2017).
5. Smirnov G.V., Zinov'ev G.G., Koval'skii K.I., Volkov S.A. Sposob izgotovleniia emalirovannykh provodov i ustroistvo dlia ego osushchestvleniia [Process of manufacturing the enamel covering wires and the device for its implementation], available at: <http://www.findpatent.ru/patent/204/2047231.html> (accessed 19 May 2017).
6. Bol'shaia entsiklopediia nefti i gaza. Protsess emalirovaniia [Oil and gas encyclopedia. Enamel covering procedure], available at: <http://www.ngpedia.ru/id344385p1.html> (accessed 19 May 2017).
7. Driakhlov A.S., Limarenko S.V., Fintiktikov V.A. Nekotorye osobennosti otsenki effektivnosti kataliticheskogo dozhiganiia rastvoritelei v emal'agregatakh s retsiklom gazovogo potoka [Some additional properties of solvent catalytic afterburning efficiency estimation in enamel package with gas flow recycle mode]. *Nauka i tekhnika*, 2005, no. 6, pp. 12-17.
8. Petrov A.V. Opredelenie teplovykh rezhimov emalirovaniia provodov [Thermal behavior determination of wire enamel coating]. *Nauka i tekhnika*, 2012, no. 2, available at: <http://www.kp-info.ru/images/File/2012%202%203-7.pdf> (accessed 19 May 2017).

9. Kostygova T.V. Tekhnologiya proizvodstva provodov [Wire manufacturing technology]. Permskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010. 69 p.

10. Borshchevskii S.G., Kholodnyi S.D., Kassikhin L.I. Issledovanie i raschet plenkoobrazovaniia pri emalirovanii [Research and calculation of film-forming when enamel coating]. Permskii politekhnicheskii institut, 1987. (Dep. v Informelektro. № 727-ET).

11. Borshchevskii S.G., Kassikhin L.I. Raschet optimal'noi skorosti emalirovaniia na stadii udaleniia rastvoritelia [Enamel coating optimum speed calculations at the stage of solvent release]. Permskii politekhnicheskii institut, 1986. (Dep. v Informelektro. № 727-ET).

12. Solov'ev S.V. Teplovoi raschet protsessa emalirovaniia provodov po zadanoi krivoi nagreva [Heat calculations of wire enamel coating according to the assigned heating curve], available at: <http://www.dslib.net/elektro-stancii/teplovoj-raschet-processa-jemalirovanija-provodov-po-zadanoj-krivoj-nagreva.html> (accessed 19 May 2017).

13. Evoliutsiia tekhnologicheskogo oborudovaniia dlia proizvodstva emalirovannykh provodov [Production facilities evolution for enamel coating wires manufacturing], available at: http://www.ruscable.ru/news/2013/02/12/Evolutsiya_tekhnologicheskogo_oborudovaniya_dlya_pr/ (accessed 19 May 2017).

14. Obmotochnye provoda s emalevoi, voloknistoi i oksidnoi izoliatsiei [Magnet wires with enameling, fibro and oxide insulation], available at: <http://www.tehnoarticles.ru/lumuniy/21.html> (accessed 19 May 2017).

Сведения об авторах

Костыгова Татьяна Васильевна (Пермь, Россия) – доцент кафедры конструирования и технологии в электротехнике Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: 2391854@mail.ru).

Путилова Анастасия Алексеевна (Пермь, Россия) – студентка Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: liminor_777@mail.ru).

Минулин Дамир Рустамович (Пермь, Россия) – технолог СГТ КТБ ВиОП ООО «Камский кабель» (e-mail: minullin@kamkabel.ru).

About the authors

Kostygova Tatyana Vasilevna (Perm, Russian Federation) is an Associate Professor at the Department of Engineering and Technology in Electrical engineering Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: 2391854@mail.ru).

Putilova Anastasiya Alekseevna (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: liminor_777@mail.ru).

Minulin Damir Rustamovich (Perm, Russian Federation) is a Technologist SGT КТБ ВиОП LLC "Kamsky cable" (e-mail: minullin@kamkabel.ru).

Получено 31.07.2017