

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

---

УДК 536:24; 537.321; 621.317.7

### ЛАБОРАТОРНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ТЕПЛОЕ СОСТОЯНИЕ РЕЗИСТИВНОГО ДЕЛИТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ<sup>1</sup>

Е.Е. ГОТОВКИНА, В.Д. ЛЕБЕДЕВ, Г.И. ПАРФЕНОВ, Н.Н. СМИРНОВ, В.В. ТЮТИКОВ  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: grinya33rus@gmail.com

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Системы тепловой самодиагностики измерительных трансформаторов, работающие в режиме реального времени, в отличие от силовых, отсутствуют, а тепловое обследование часто проводится по графику обслуживания, что сказывается на надежности работы электрооборудования. Следовательно, создание таких систем для цифровых измерительных комбинированных трансформаторов тока и напряжения на основе резистивных делителей, выдающих значения температуры по нескольким точкам, в том числе и по наиболее разогретому элементу, является важной задачей. Целью исследования является получение экспериментальных данных о тепловом состоянии резистивного делителя при воздействии на него параметров окружающей среды и напряжения для разработки системы самодиагностики.

**Материалы и методы.** Результаты получены путем физического моделирования тепловых режимов работы трансформатора и его элементов в высоко- и низковольтных климатических камерах. Осуществлено моделирование воздействия таких критически важных факторов, как электрическое напряжение, инсоляция, температура и скорость движения окружающего воздуха. Обработка данных произведена с использованием методов теории вероятностей и математической статистики.

**Результаты.** Определены время выхода термодинамической системы на стационарный режим теплообмена, а также значения температур на резисторах и на поверхности делителя. Установлено, что большее влияние на тепловой режим оказывает моделируемое напряжение, чем инсоляция. Показано, что в самых тяжелых аварийных режимах работы температура нагрева нижнего резистора не превышает критического значения. Выявлено существенное влияние моделируемых факторов, в том числе направленной инсоляции, которая не учитывается в существующих методах расчета теплового состояния измерительного электрооборудования, на тепловое состояние трансформатора.

**Выводы.** Достоверность полученных результатов обеспечивается учетом значимых факторов при моделировании теплового состояния делителя. Результаты эксперимента предполагается использовать для разработки системы тепловой самодиагностики цифрового трансформатора, которая позволит повысить надежность эксплуатации данного измерительного оборудования вследствие оператив-

---

<sup>1</sup> Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы» по теме «Мультифункциональная система на основе цифровых трансформаторов тока и напряжения для цифровой подстанции» (Соглашение №14.577.21.0276 о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г., уникальный идентификатор прикладных научных исследований (проекта) RFMEFI57717X0276).

ного реагирования персонала на получаемую в режиме реального времени информацию о тепловом состоянии трансформатора.

**Ключевые слова:** резистивный делитель, тепловое состояние, напряжение, инсоляция, климатическая камера

## A LABORATORY STUDY OF ENVIRONMENT AND VOLTAGE EFFECTS ON THE THERMAL STATE OF RESISTIVE VOLTAGE DIVIDER

E.E. GOTOVKINA, V.D. LEBEDEV, G.I. PARFENOV, N.N. SMIRNOV, V.V. TYUTIKOV  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: grinya33rus@gmail.com

### Abstract

**Background.** There are currently no thermal self-diagnostics systems of instrument transformers operating in real time, as opposed to power ones, and thermal inspections are often carried out according to a maintenance schedule, which affects the reliability of electrical equipment. Therefore, an important task is to create such systems for digital instrument combined current and voltage transformers based on resistive dividers, which determine temperature values at several points, including the most heated element. The aim of this study is to obtain experimental data on the thermal state of a resistive divider exposed to environmental factors and voltage for developing a self-diagnostics system.

**Materials and methods.** The results are obtained by physical simulation of thermal conditions of the transformer and its elements in high- and low-voltage climatic chambers. The effects of the following factors of critical importance have been simulated: electric voltage, insolation, temperature and speed of the ambient air. Data processing was performed using the methods of probability theory and mathematical statistics.

**Results.** The time needed for the thermodynamic system to move to a steady heat exchange mode, and also the temperatures on the lower resistors and on the surface of the voltage transformer insulation cover have been determined. It has been established that thermal conditions are more significantly affected by the simulated voltage than by insolation. The study has shown that even in the most severe emergency operating modes, heating in the lower resistor does not exceed the critical value. It has been found that the thermal state of the transformer is significantly influenced by the simulated factors including directional insolation, which is not taken into account in the existing methods of calculating the thermal state of the instrument electrical equipment.

**Conclusions.** The reliability of the obtained results is ensured by the fact that the simulation took into account significant factors. The results of the experiment will be used to develop a thermal self-diagnostics system for the digital transformer, which will improve the reliability of operation of such instrument equipment by allowing the personnel's to give a rapid response to real-time information about the transformer thermal state.

**Key words:** resistive divider, thermal state, voltage, insolation, climate chamber

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2019.2.005-016

**Введение.** При работе комбинированных цифровых трансформаторов тока и напряжения летом в условиях высоких значений температуры воздуха, инсоляции и возможного превышения номинальных значений напряжения в электрических сетях важной задачей является исследование теплообмена трансформатора с окружающей средой.

Методы тепловой защиты от перегрева силовых трансформаторов напряжения широко известны [1, 2]. При эксплуатации измерительных трансформаторов тока и напряжения тепловое обследование проводится по графику обслуживания [3, 4], что сказывается на надежности работы электрооборудования [5]. Следовательно, раз-

работка новых систем самодиагностики теплового состояния цифровых измерительных трансформаторов, выдающих значения температуры по наиболее разогретому элементу в оборудовании в реальном времени, является важной задачей, особенно при разработке решений в области «умных» электрических сетей. В отечественной электроэнергетике системы (и комплексы) тепловой самодиагностики цифровых измерительных трансформаторов отсутствуют.

Для разработки алгоритмов тепловой самодиагностики необходимы данные физического и математического моделирования тепловых режимов работы трансформаторов при воздействии различных неблагоприятных факторов. При проведении

численных экспериментов с помощью программных средств, позволяющих моделировать теплообмен трансформатора с окружающей средой при изменении граничных условий, важным является достоверность полученных результатов. Результаты лабораторных исследований можно использовать для верификации математической модели по определению температурных полей комбинированного цифрового трансформатора при различных граничных условиях.

В лабораториях кафедр «Техника высоких напряжений» и «Промышленная теплоэнергетика» была проведена серия физических экспериментов по изучению влияния электрического напряжения, высоких температур окружающего воздуха и инсоляции на температурный режим работы резистивного делителя цифрового комбинированного трансформатора, а также по определению температуры разрушения резистора при неблагоприятных условиях. Изучалась динамика происходящих процессов.

В цифровом измерительном трансформаторе (рис. 1), разработанном коллективом ученых ИГЭУ и ООО НПО «ЦИТ» [6], в качестве первичного преобразователя напряжения используется резистивных делитель, состоящий из нескольких резисторов.

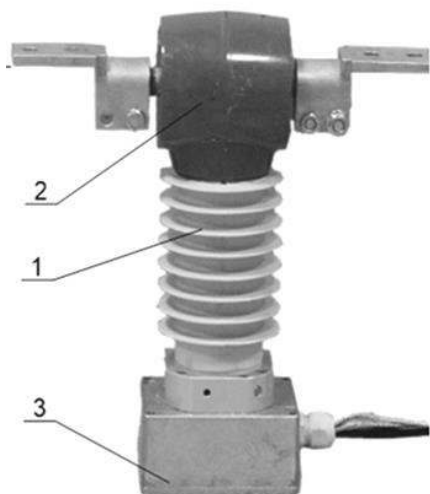


Рис. 1. Внешний вид комбинированного цифрового трансформатора 6 (10) кВ: 1 – первичный преобразователь напряжения; 2 – первичный преобразователь силы тока; 3 – электронный блок на стороне низкого напряжения

В соответствии с законом Джоуля-Ленца, протекание тока через резисторы приводит к выделению тепловой энергии.

Перегрев резистора может привести к выходу из строя данной измерительной техники.

**Методы исследования в высоковольтной климатической камере.** Часть исследований осуществлялась в климатической камере, предназначенной для высоковольтных испытаний. Схема камеры и ее общий вид с установленным оборудованием показаны на рис. 2.

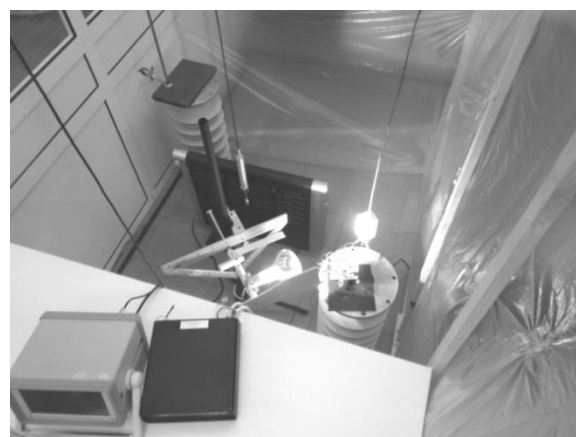
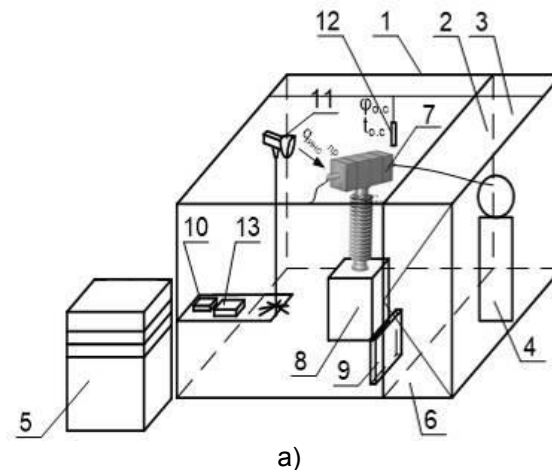


Рис. 2. Схема (а) и вид (б) климатической камеры в лаборатории высоковольтных испытаний: 1 – теплое отделение камеры; 2 – перегородка; 3 – отсек для повышающего трансформатора; 4 – повышающий трансформатор; 5 – пульт управления; 6 – дверь в отсек; 7 – испытываемый образец; 8 – заземленная подставка под образец; 9 – теплонагреватель; 10 – измеритель-регулятор температуры ИРТ-4/16; 11 – лампа накаливания для моделирования инсоляции; 12 – первичный преобразователь влажности и температуры ИПВТ-03-01; 13 – термогигрометр ИВТМ-7/8-Т-8Р-8А

Климатическая камера представляет собой замкнутое, изолированное помещение, состоящее из двух отделений: теплового

отделения и отсека для повышающего трансформатора напряжения. Ограждение теплового отделения выполнено из ПВХ-пленки. В теплом отделении располагается нагреватель, который используется для поддержания постоянной температуры окружающей среды, создавая необходимый тепловой режим, соответствующий наихудшим условиям работы трансформатора с учетом климатического исполнения и категории размещения.

В камеру был подведен электрод для подачи высокого напряжения на испытываемый образец от лабораторной установки УИВ-150 кВ, которая состояла из пульта управления и повышающего трансформатора.

С помощью датчиков фиксировались температуры и влажность воздуха, а также температуры на резисторах. Приборная погрешность измерения относительной влажности воздуха составляла  $\pm 2\%$ , температуры –  $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для фиксации температурных полей на поверхности трансформатора также применялся тепловизор TESTO 875-1i. Для моделирования солнечной радиации (инсоляции) на принимающую поверхность в теплом отделении камеры использовалась лампа накаливания мощностью 250 Вт (рис. 3) с шарообразной формой колбы и светоотражающим зеркальным покрытием, позволяющим создавать направленный световой поток.

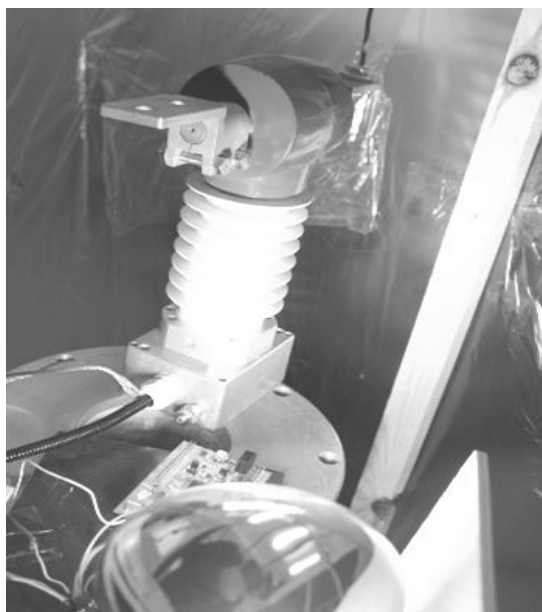


Рис. 3. Моделирование инсоляции на трансформатор с помощью лампы накаливания с зеркальным светоотражающим покрытием

Лампу располагали на устройстве, позволяющем изменять и фиксировать угол положения лампы относительно горизонта. Для тарировки значений лучистой энергии, испускаемой лампой накаливания на поверхность, были проведены предварительные эксперименты.

**Результаты исследований теплообмена резистора с окружающей средой.** Эксплуатация резистивного делителя напряжения при различных тепловых режимах влияет на его работоспособность.

В предварительном эксперименте определялись температуры разрушения одного из резисторов, входящих в состав делителя, и потери им основных свойств в воздушной среде. За исходный режим принимался аварийный, в котором подводимое напряжение было в 2,1 раза выше номинального. При проведении эксперимента на поверхности нижнего контактного колпачка резистора был зафиксирован датчик температуры В57861S, соединенный с вторичным прибором через термоинтерфейс. Величина сопротивления датчика температуры составляла  $R_d = 10\text{ кОм}$  при  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  с погрешностью  $1\%$ . Охлаждающей средой являлся воздух, инсоляция отсутствовала. В камере поддерживался тепловой режим с температурой окружающего воздуха  $t_{o.c.} = 34\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Начальное условие: температурное поле резистора в начальный момент времени  $34\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На резистор подавалось напряжение; определялись время выхода на стационарный режим и температурное поле. Подводимое напряжение ступенчато увеличивалось на  $1\text{ кВ}$  с выдержкой времени до установившегося режима, разрушения резистора или потери им основных свойств.

В ходе испытаний при моделировании аварийного режима работы температура на поверхности резистора вышла на установившийся режим в течение 18 минут (рис. 4). При температуре около  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  начался процесс обугливания наружного слоя резистора, при температуре около  $240\text{ }^{\circ}\text{C}$  началось выделение дыма, обильность которого росла с увеличением температуры. Резистор начал терять свои основные свойства: в виду образования поверхностного проводящего слоя, напряжение на выходе установки начало снижаться. При температуре около  $340\text{ }^{\circ}\text{C}$  произошло возгорание резистора, после чего эксперимент был остановлен (рис. 4, 5).

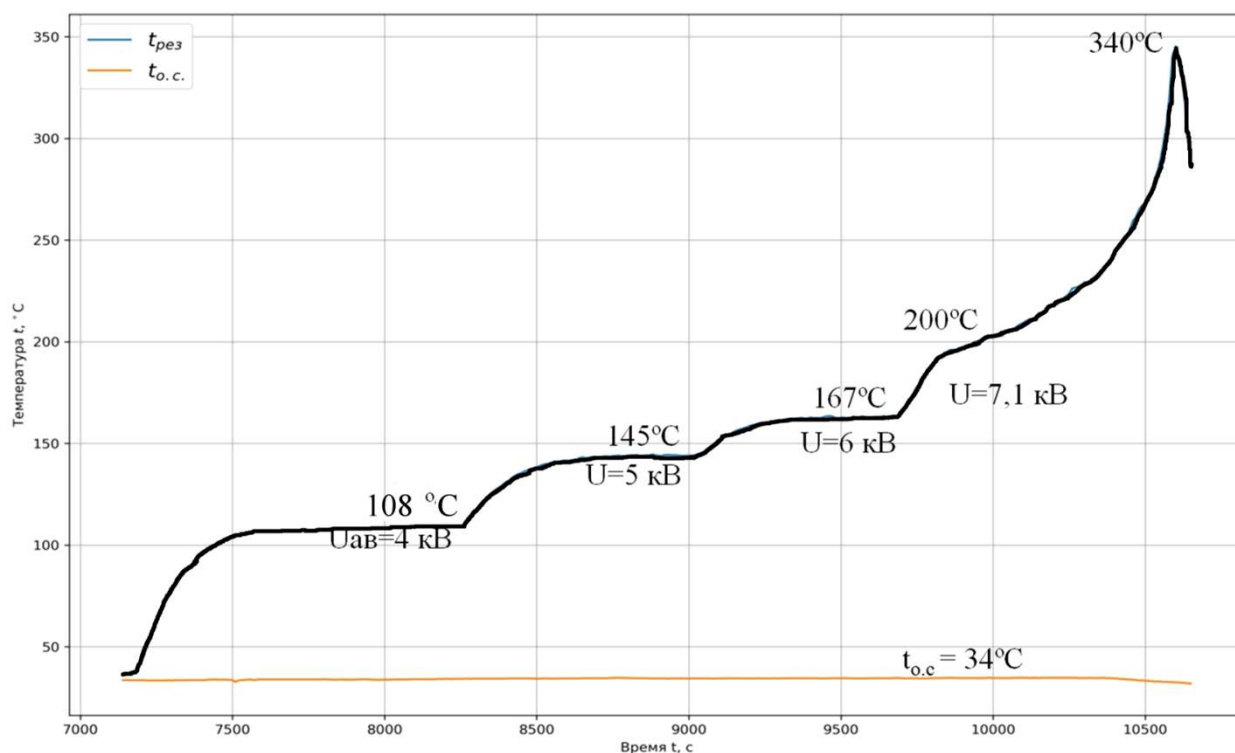


Рис. 4. Графики зависимости температуры на нижнем контактном колпачке резистора и окружающей среды от времени:  $t_{рез}$  – температура на поверхности резистора;  $t_{о.с.}$  – температура окружающей среды



Рис. 5. Общий вид испытываемого образца после испытаний (обугленный)

После окончания эксперимента было измерено сопротивление резистора, которое увеличилось относительно начального в 10 раз. В результате эксперимента было получено, что за критическую температуру работы резистора принимается значение  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , но так как резистор в цифровом трансформаторе располагается в силиконовой заливке, то критическую температуру работы трансформатора необходимо снизить до  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура начала разрушения силикона).

После определения допустимых температур работы единичного резистора были также произведены испытания резистора, помещенного в центре силиконовой

изоляции, идентичной используемой в резистивном делителе, при различных значениях напряжения и при моделировании нормативных значений температур воздуха в пределах  $38\text{--}40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (с помощью теплонагревателя) и инсоляции (с помощью лампы накаливания) (рис. 6).

Анализ экспериментальных данных по исследованию теплового состояния резистора показал, что подаваемое напряжение и инсоляция в значительной степени оказывают влияние на тепловой режим объекта.

Первая серия экспериментов проводилась в случае отсутствия инсоляции. При номинальном фазном напряжении (рис. 7, а) на один резистор подавалось напряжение  $U_{ном.ф}$ , резистор прогревался до температуры  $t_p = 59\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 1 час 55 минут, причем температура на поверхности изоляции возрастала до  $t_{пов} = 41\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При напряжении  $1,2U_{ном.ф}$  резистор прогревался до температуры  $t_p = 68\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 2 часа 25 минут, причем температура на поверхности возрастала до  $t_{пов} = 44\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При аварийном напряжении  $2,1U_{ном.ф}$  резистор прогревался до температуры  $t_p = 114\text{ }^{\circ}\text{C}$  за 2 часа 5 минут, причем температура на поверхности возрастала до  $t_{пов} = 49\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

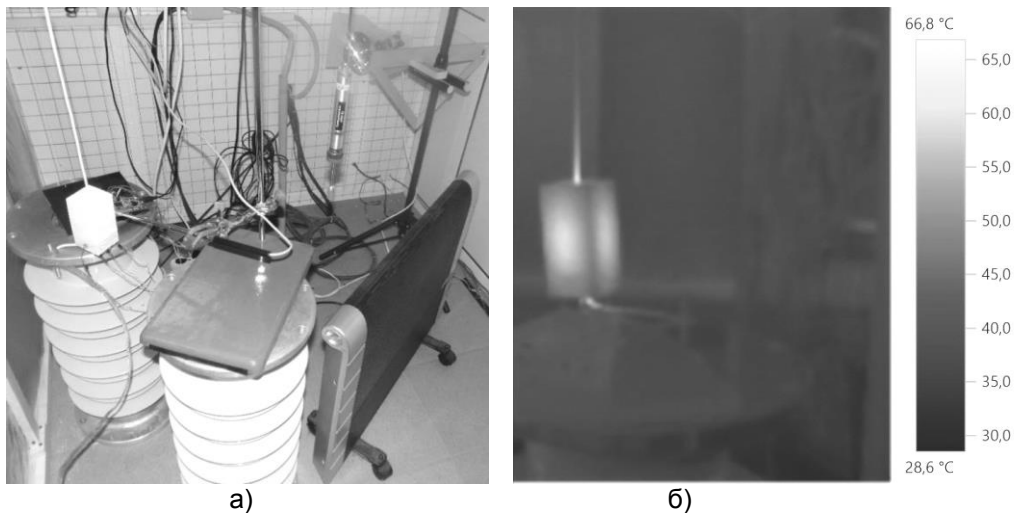


Рис. 6. Вид испытательной установки (а) и термограмма (б) резистора в силиконовой оболочке

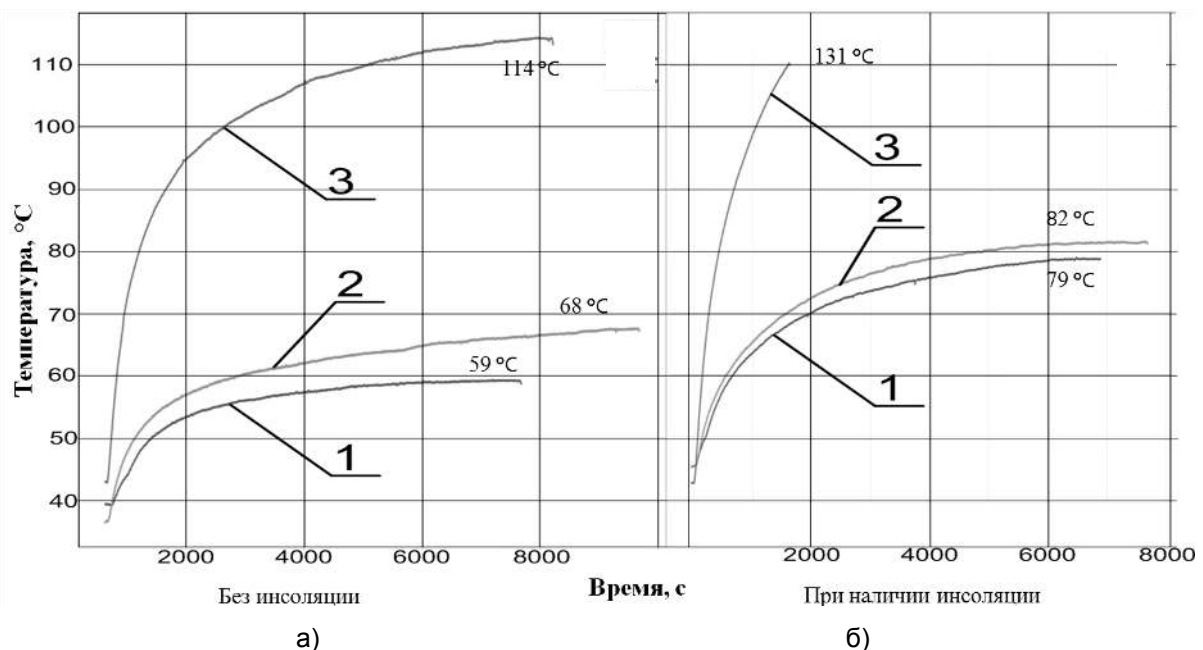


Рис. 7. Графики зависимости температуры резистора от времени при отсутствии (а) и наличии (б) инсоляции при подаче напряжения: 1 –  $U_{\text{ном.ф}}$ ; 2 –  $1,2 \cdot U_{\text{ном.ф}}$ ; 3 –  $2,1 \cdot U_{\text{ном.ф}}$

Во второй серии экспериментов с моделированием инсоляции (рис. 7,б) при номинальном напряжении  $U_{\text{ном.ф}}$  резистор прогревался до температуры  $t_p = 79^\circ\text{C}$  за 2 часа, причем температура на поверхности со стороны лампы возрастала до  $t_{\text{пов}} = 110^\circ\text{C}$ . При данном напряжении инсоляция дополнительно увеличивала температуру на резисторе на  $\Delta t_p = 20^\circ\text{C}$ , а на поверхности силикона со стороны лампы – на  $\Delta t_{\text{пов}} = 69^\circ\text{C}$ .

При максимальном рабочем напряжении  $1,2 U_{\text{ном.ф}}$  резистор прогревался до температуры  $t_p = 82^\circ\text{C}$  за 2 часа 5 мин, причем инсоляция дополнительно увеличивала температуру на резисторе на  $\Delta t_p = 14^\circ\text{C}$ .

При аварийном напряжении  $2,1 U_{\text{ном.ф}}$  резистор прогревался до температуры  $t_p = 131^\circ\text{C}$ , причем температура на поверхности со стороны лампы возрастала до  $t_{\text{пов}} = 112^\circ\text{C}$ . Мы видим, что в данном случае температура на резисторе выше, чем температура на поверхности изоляции.

Инсоляция дополнительно увеличивала температуру на резисторе на  $\Delta t_p = 17^\circ\text{C}$ , а на поверхности силикона со стороны лампы – на  $\Delta t_{\text{пов}} = 63^\circ\text{C}$ .

**Результаты исследований теплообмена резистивного делителя 6(10) кВ с окружающей средой.** Для цифрового измерительного трансформатора напряжения 6(10) кВ (см. рис. 1) моделировался

штатный режим работы трансформатора при номинальном напряжении  $U_{ном} = 10$  кВ (фазное напряжение  $U_{ном.ф} = 5,77$  кВ), а также аварийный. При аварийном режиме напряжение увеличивали в 2,1 раза относительно номинального. Изменение напряжения производили только после момента выхода системы на стационарный режим теплообмена. В камере поддерживался тепловой режим с температурой окружающего воздуха  $t_{о.с} = 44$  °С при нормальном атмосферном давлении.

Согласно требованиям по электробезопасности, датчики температуры размещались на нижнем контактном колпачке нижних резисторов.

На рис. 8 показаны термограммы поверхности трансформатора при аварийном

режиме работы для двух вариантов (отсутствие / наличие инсоляции).

Термограммы поверхности трансформатора показывают, что наиболее сильно прогревался средний элемент в резистивном делителе. Так, температура на поверхности изоляции в зоне среднего резистора составила  $t_{пов} = 109$  °С, в то время как у верхнего резистора 101 °С. В зоне нижнего резистора температура была также меньше. Следовательно, из-за эффекта от подогрева верхнего и нижнего резисторов средний резистор нагревается больше остальных, поэтому размещение температурного датчика на нижнем резисторе не может однозначно отображать тепловую картину среднего резистора.

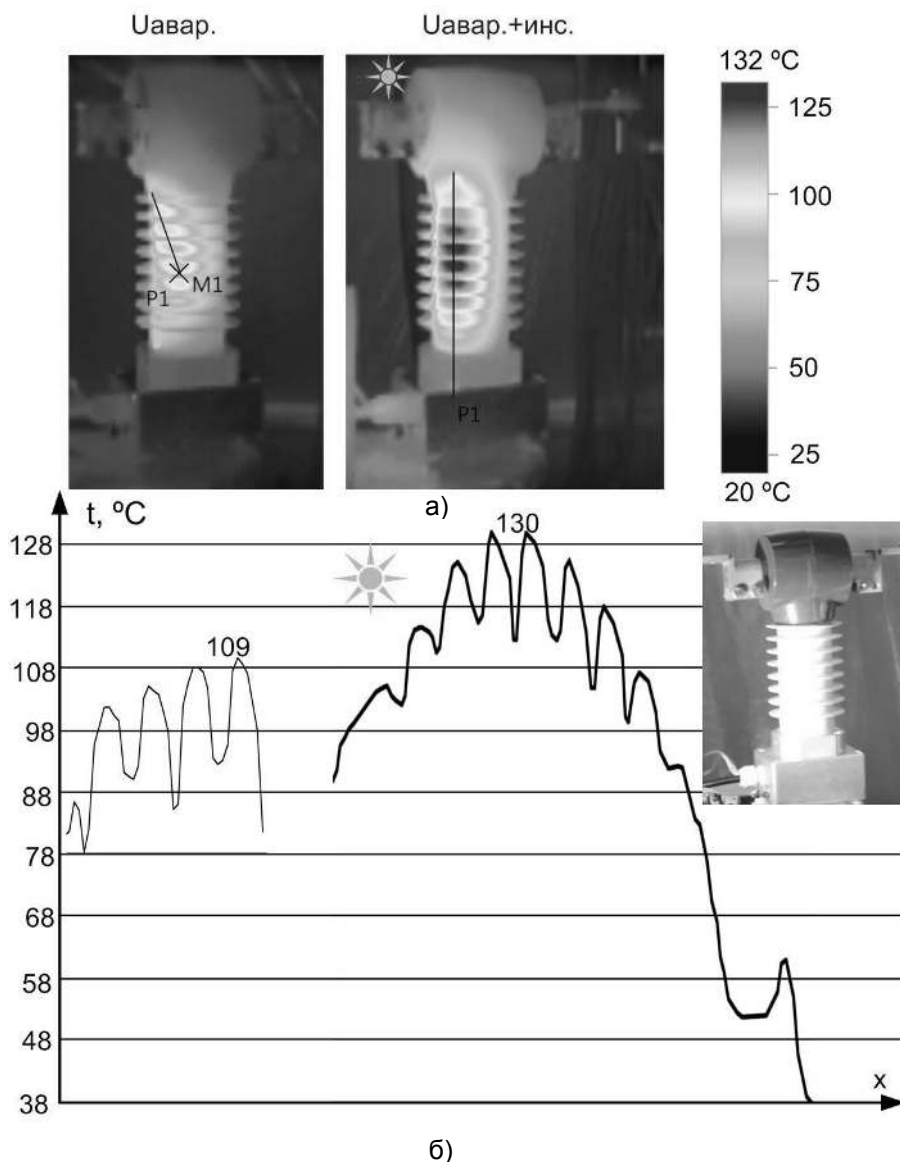


Рис. 8. Термограмма поверхности трансформатора напряжения при аварийном режиме работы в случае отсутствия/наличия инсоляции (а) и температурные графики по секущей линии P1 (б)

В результате эксперимента показана необходимость учета поправки на формирование температурного поля внутри делителя от взаимного расположения резисторов в пространстве первичного преобразователя напряжения. Инсоляция при аварийном режиме работы еще более увеличивала термонапряженное состояние среднего резистора, причем температура на поверхности крышки трансформатора в зоне расположения максимально нагретого резистора увеличивалась до  $t_{пов} = 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Следовательно, температура на наиболее разогретом резисторе, находящемся внутри трансформатора, несколько выше  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Как показали результаты исследований теплового состояния резистивных делителей в измерительном цифровом трансформаторе, подаваемое напряжение и моделируемая инсоляция также в значительной степени оказывают влияние на тепловое состояние объекта (рис. 9).

Так как подача напряжения на испытываемый трансформатор осуществлялась сразу же после достижения температуры воздуха  $t_{o.c}$  в теплом отделении значения  $41\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то на графике можно наблюдать, что

воздух прогревался быстрее, чем корпус трансформатора, поэтому на момент подачи напряжения температура на резисторе была несколько меньше температуры окружающего воздуха вследствие некоторой тепловой инерционности материалов данного электрооборудования. Но за счет саморазогрева резисторов температура в зоне их расположения довольно быстро увеличивалась.

При номинальном напряжении  $U_{ном.ф}$  без инсоляции резистор прогревался до температуры  $t_p = 56\text{ }^{\circ}\text{C}$  (рост на  $\Delta t_p = 21\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Нагрев резисторов из исходного состояния до стационарного теплового режима произошел за 3 часа.

Моделирование инсоляции на поверхность трансформатора значительно увеличило данные температурные параметры. Так, резистор прогрелся до температуры  $t_p = 74\text{ }^{\circ}\text{C}$  (увеличение на  $\Delta t_p = 39\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). В данном варианте инсоляция дополнительно нагрела резистор на  $\Delta t_{инс} = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Нагрев резисторов из исходного состояния до стационарного теплового режима произошел в опыте также за 3 часа.

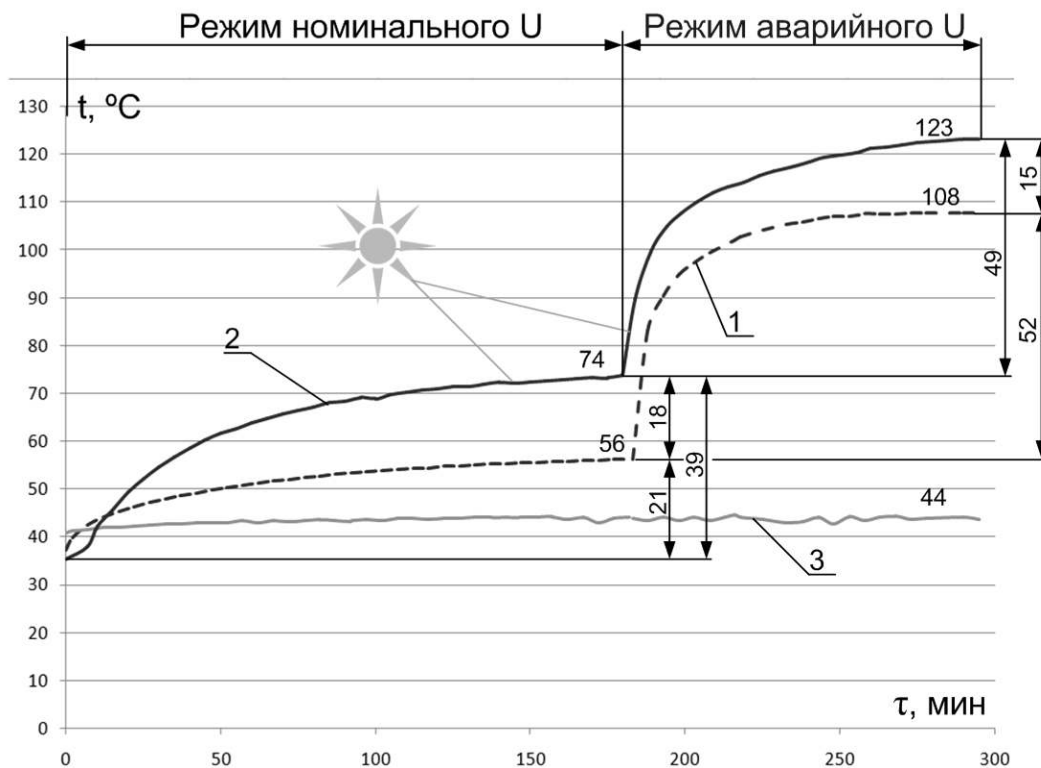


Рис. 9. Графики зависимости температур на нижнем контактном колпачке нижнего резистора  $t_p$  и окружающей среды  $t_{o.c}$  от времени при номинальном и аварийных режимах работы трансформатора напряжения: 1 – при отсутствии инсоляции; 2 – при наличии инсоляции; 3 – температура воздуха



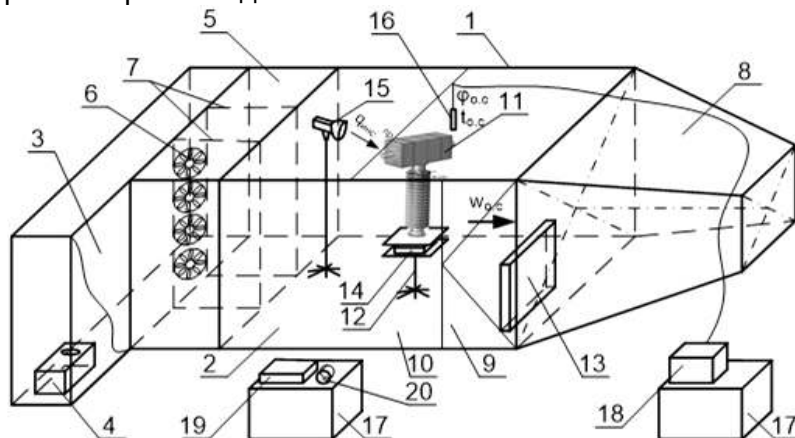
Моделируемый аварийный режим работы электрических сетей логично привел к значительному увеличению значений температуры. В случае отсутствия инсоляции температура на резисторе увеличилась до  $t_p = 108 \text{ }^\circ\text{C}$  (или на  $\Delta t_{ав.р} = 52 \text{ }^\circ\text{C}$ , что в 2,5 раза больше увеличения температуры при номинальном режиме работы трансформатора). Выход системы на стационарный режим произошел за 2,2 часа, причем значительное приращение температуры наблюдалось в первые 20 минут опыта с моделированием аварийного напряжения.

Инсоляция дополнительно повысила эффект от работы оборудования в аварийном режиме. Температура на резисторе увеличилась до  $t_p = 123 \text{ }^\circ\text{C}$  (или на  $\Delta t_{ав.р} = 49 \text{ }^\circ\text{C}$ , что в 1,3 раза больше увеличения температуры при номинальном режиме работы трансформатора). В данном аварийном режиме работы делителя

инсоляция дополнительно нагрела резистор на  $\Delta t_{инс} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ , что сопоставимо с эффектом от инсоляции в номинальном режиме работы оборудования.

Можно заметить, что прирост температуры резистора от повышения напряжения до аварийных значений ( $\Delta t_{ав.р} = 52 \text{ }^\circ\text{C}$ ) был в 2,9 раза больше, чем увеличение температуры от воздействия на резистор инсоляции ( $\Delta t_{инс} = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

**Методы исследования в низковольтной климатической камере.** Климатическая камера (рис. 10), реализованная в деревянном каркасе и изолированная от внешней среды с помощью ПВХ-пленки, представляла собой помещение, состоящее из четырех отделений: испытательного отделения, отсека для генерации дыма, вентиляционного и выходного отсеков.



а)



б)

Рис. 10. Схема (а) и вид климатической камеры для низковольтных испытаний (б): 1 – деревянный каркас камеры; 2 – испытательное отделение; 3 – отсек для генерации дыма; 4 – дым-машина; 5 – вентиляционный отсек; 6 – вентиляторы; 7 – направляющие перегородки; 8 – выходной отсек камеры; 9 – дверь в отделение; 10 – лист оргстекла; 11 – испытываемый образец; 12 – подставка под образец; 13 – теплонагреватель; 14 – измеритель-регулятор температуры ИРТ-4/16; 15 – лампа накаливания для моделирования инсоляции; 16 – первичный преобразователь влажности и температуры ИПВТ-03-01; 17 – подставки под измерительные приборы; 18 – термогигрометр ИВТМ-7/8-Т-8Р-8А; 19 – милливольтметр Щ-300; 20 – коммутатор-переключатель

В вентиляционном отсеке располагалось 4 вентилятора для ступенчатого регулирования расхода воздуха путем включения тех или иных нагнетателей. Испытательное отделение было создано для моделирования на поверхности комбинированного трансформатора как естественной, так и вынужденной конвекции. В случае моделирования естественной конвекции отделение ограждалось от вентиляционного и выходного отсека с помощью дополнительного слоя ПВХ-пленки. В испытательном отделении располагали нагревательный элемент для моделирования воздушного теплового режима, а также лампу накаливания – для инсоляции.

Для определения коэффициентов теплоотдачи на оребренную поверхность резистивного делителя напряжения устанавливали тепломер (на основе термобатареи) и дифференциальную термопару. Фиксировались значения коэффициентов теплоотдачи при естественной и вынужденной конвекции, температуры на поверхностях, а также линии токов воздушных потоков (с помощью подсветки лампой паров глицерина в воздушных массах).

**Результаты исследований по определению коэффициентов теплоотдачи с поверхности трансформатора в низковольтной камере.** Было установлено (рис. 11), что коэффициент теплоотдачи конвекцией у внешней поверхности трансформатора при естественной конвекции в большей степени зависит от разности температур на поверхности и окружающей

среды, а при вынужденной конвекции – от значения скорости воздушных масс, причем теплоотдача на поверхности ребра, обращенной вверх, выше, чем на поверхности цилиндра и тем более на поверхности ребра, обращенной вниз, что согласуется с известными данными [7, 8].

Следует отметить, что в случае вынужденной конвекции на поверхности трансформатора устанавливался турбулентный режим движения воздушных масс (при наиболее часто встречающихся значениях скоростей воздушного потока).

**Выводы.** В ходе тепловых и аэродинамических исследований было определено, что даже в самых тяжелых аварийных режимах работы температура нагрева нижнего резистора не превышала критического значения (принята в пределах 150 °С исходя из характеристик электроизолирующего материала). Максимальные значения температур фиксировались в центральной части трансформатора напряжения. Моделируемое напряжение оказывало на тепловой режим исследованного резистивного делителя трансформатора большее влияние, чем инсоляция.

Полученные экспериментальные значения предполагается использовать при разработке алгоритма и системы тепловой самодиагностики цифрового трансформатора. Результаты испытаний должны быть учтены при разработке и верификации математической модели теплообмена трансформатора с окружающей средой.

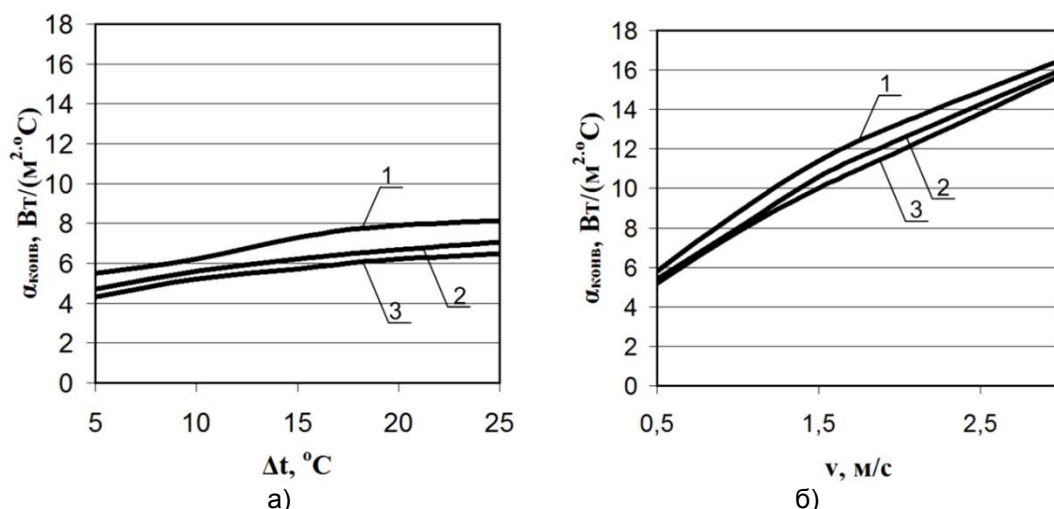


Рис. 11. Зависимость коэффициентов конвективной теплоотдачи на поверхности трансформатора при естественной (а) и вынужденной (б) конвекции: 1 – на поверхности ребра, обращенной вверх; 2 – на цилиндре; 3 – на поверхности ребра, обращенной вниз

## Список литературы

1. **Hunt R., Giordano M.L.** Thermal over-load protection of power transformers – operating theory and practical experience. – Atlanta: Georgia Tech, 2005. – 33 с.
2. **Grigsby L.L.** The Electric Power Engineering Handbook. – Boca Raton: CRC Press, 2001. – 117 с.
3. **Zhang L., Shi H., Zhang Y.** Analysis of causes and prevention methods for power network accidents // *Power System Protection and Control*. – 2010. – № 4. – С. 210–216.
4. **Susakova T.V., Evseeva A.M.** Analysis and prevention of accident-caused faults in power cable lines // *MATEC Web of Conference*. – 2017. – № 110. – 4 с. DOI: 10.1051/mateconf/201711001077
5. **Результаты** длительной периодической диагностики силовых трансформаторов / Ю.П. Аксенов, А.В. Голубев, В.И. Завидей и др. // *Электро*. – 2006. – № 1. – С. 28–35.
6. **Lebedev V., Zhukov V., Yablokov A.** Analysing the thermal state of voltage transformer based on resistive voltage divider // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*. – 2015. – № 93. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/93/1/012020
7. **Han J.C., Glicksman L.R., Rohsenow W.M.** An investigation of heat transfer and friction for rib-roughness surfaces // *International journal of heat mass transfer*. – 1978. – № 21. – С. 1143–1156. DOI: 10.1016/0017-9310(78)90113-8
8. **Бухмиров В.В.** Тепломассообмен. – Иваново, 2014. – 360 с.

## References

1. Hunt, R., Giordano, M.L. Thermal over-load protection of power transformers – operating theory and practical experience. Atlanta, Georgia Tech, 2005. 33 p.
2. Grigsby, L.L. The Electric Power Engineering Handbook. Boca Raton, CRC Press, 2001. 117 p.
3. Zhang, L., Shi, H., Zhang, Y. Analysis of causes and prevention methods for power network accidents. *Power System Protection and Control*, 2010, issue 4, pp. 210–216.
4. Susakova, T.V., Evseeva, A.M. Analysis and prevention of accident-caused faults in power cable lines. *MATEC Web of Conference*, 2017, issue 110, 4 p. DOI: 10.1051/mateconf/201711001077
5. Aksenov, Yu.P., Golubev, A.V., Zaviday, V.I., Yurin, A.V., Yaroshenko, I.V. Rezul'taty dlitel'noy periodicheskoy diagnostiki silovykh transformatorov [Results of long-term periodic diagnostics of power transformers]. *Elektro*, 2006, issue 1, pp. 28–35.
6. Lebedev, V., Zhukov, V., Yablokov, A. Analysing the thermal state of voltage transformer based on resistive voltage divider. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE)*, 2015, issue 93, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1757-899X/93/1/012020
7. Han, J.C., Glicksman, L.R., Rohsenow, W.M. An investigation of heat transfer and friction for rib-roughness surfaces. *International journal of heat mass transfer*, 1978, issue 21, pp. 1143–1156. DOI: 10.1016/0017-9310(78)90113-8
8. Bukhmirov, V.V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass exchange]. Ivanovo, 2014. 360 p.

*Готовкина Елена Евгеньевна,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», программист отдела компьютерных средств обучения ЭЭФ, телефон (4392) 26-99-02.

*Gotovkina Elena Evgenyevna,*

Ivanovo State Power Engineering University, Programmer of the Computer Learning Tools Department of the Electrical Power Engineering Faculty, tel. (4392) 26-99-02.

*Лебедев Владимир Дмитриевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, зав. кафедрой автоматического управления электроэнергетическими системами, e-mail: vd\_lebedev@mail.ru

*Lebedev Vladimir Dmitrievich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Head of the Department of Automatic Control of Electric Power Systems, e-mail: vd\_lebedev@mail.ru

*Парфенов Григорий Иванович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», студент, e-mail: grinya33rus@gmail.com

*Parfenov Grigory Ivanovich,*

Ivanovo State Power Engineering University, Student, e-mail: grinya33rus@gmail.com

*Смирнов Николай Николаевич,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доцент кафедры промышленной теплоэнергетики, e-mail: nsmirnov@bk.ru  
*Smirnov Nikolay Nikolayevich,*  
Ivanovo State Power Engineering University, Associate Professor of the Industrial Heat Power Engineering Department, e-mail: nsmirnov@bk.ru

*Тютиков Владимир Валентинович,*  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, проректор по научной работе, зав. кафедрой автоматизации технологических процессов, e-mail: tvv@ispu.ru  
*Tyutikov Vladimir Valentinovich,*  
Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Vice-Rector for Scientific Work, Head of the Department of Automation of Technological Processes, e-mail: tvv@ispu.ru

УДК 532.546.3

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НАСЫПНОЙ САДКИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ПОРОЗНОСТИ И СКОРОСТИ ФИЛЬТРАЦИИ

Г.А. ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ, В.А. ГОРБУНОВ, О.Б. КОЛИБАБА  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: mkandy@mail.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Одним из эффективных способов интенсификации процессов теплообмена в насыпной садке является организация фильтрации газов через садку. Однако необходимо сопоставлять получаемый положительный эффект при уменьшении времени нагрева, а следовательно, и необходимого количества подводимой тепловой энергии, с сопротивлением насыпной садки, которое влияет на выбор оборудования. Существующие формулы для определения сопротивления слоя садки имеют ограничения к применению по ряду, как правило, структурных показателей. Таким образом, нахождение величины аэродинамического сопротивления насыпных садок различной структуры является важной задачей для определения количества энергии, затрачиваемой для организации процесса фильтрации.

**Материалы и методы.** Использованы данные, полученные в ходе экспериментального исследования процесса фильтрации флюида через пористую среду в диапазоне значений порозности. Для аппроксимации искомой зависимости использован метод нелинейного регрессионного анализа.

**Результаты.** На основе данных, полученных в ходе экспериментального исследования по сопротивлению насыпных садок с различной порозностью, выведена эмпирическая полиномиальная зависимость сопротивления насыпной садки от массового расхода флюида и величины порозности. Приведенное уравнение может быть использовано при изменении скорости фильтрации от 2 до 8 м/с и значений порозности от 0,345 до 0,888 независимо от структурных показателей слоя садки. Проведено математическое моделирование процесса фильтрации воздуха через садку при замене реальной структуры фракталоподобной моделью.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют оптимизировать режимные параметры работы оборудования в термических нагревательных печах, также представленная зависимость может быть использована для определения аэродинамического сопротивления насыпных садок, влияющего на выбор тягодутьевого оборудования при реконструкции печей. Достоверность полученных результатов определяется погрешностью проведенного эксперимента, составляющей не более 7 %.

**Ключевые слова:** аэродинамическое сопротивление, порозность, насыпная садка, фрактал, математическое моделирование, фильтрация флюида