

УДК 621.382.3.029

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ
ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА В ТЕПЛОВОЙ КАМЕРЕ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МОЩНЫХ СВЧ МОДУЛЕЙ**

К.Н. Колпаков

АО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Конвективный теплообмен описывается уравнением Навье-Стокса, которое в общем случае не имеет аналитического решения. Одним из подходов к решению практических задач, связанных с расчётом процессов теплообмена, является использование методов теории критериальных уравнений. В данной работе исследуются процессы тепломассопереноса между потоком охлаждающего воздуха и теплоотводящей поверхностью активно функционирующего СВЧ модуля.

Ключевые слова: *критериальные уравнения, конвективный теплообмен, СВЧ модуль, коэффициент теплоотдачи, скорость потока охлаждающего воздуха, температура корпуса*

Сведения об авторе: *Колпаков Константин Николаевич, kolpakov@pulsarnpp.ru*

**USING THE CRITERIAL EQUATIONS FOR THE DESCRIPTION
OF HEAT TRANSFER IN HEAT CHAMBER FOR MICROWAVE
POWER MODULES TESTING**

K.N. Kolpakov

S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

Convective heat transfer is described by the Navier–Stokes equation, which in general has no analytical solution. One approach to solving practical issues associated with the simulation of the heat transfer is to use the methods of the theory of criterial equations. This paper is dedicated to the study of the processes of heat-and-mass transfer between the cooling air flow and the heat sink surface of an actively functioning microwave module.

Keywords: *criterial equations, convective heat transfer, microwave module, heat transfer coefficient, cooling air flow rate, case temperature*

Author: *Kolpakov Konstantin Nikolaevich, kolpakov@pulsarnpp.ru*

Введение

Для повышения качества и надёжности выпускаемых твердотельных СВЧ модулей на конечных стадиях технологического процесса изготовления проводятся отбраковочные испытания, позволяющие выявить изделия со скрытыми дефектами [1].

Наиболее эффективным методом является испытание под совмещённой тепловой и электрической нагрузкой. Для проведения технологической термоэлектротренировки испытываемое изделие помещают в тепловую камеру и подают на него требуемую электрическую мощность. Таким образом, весьма актуальной является задача создания устройства, имитирующего воздействие внешних факторов на СВЧ модуль.

Расчёт и разработка автоматизированной системы конвективного теплообмена, обеспечивающей требуемый тепловой режим при испытаниях модуля, требует исследования процессов теплового взаимодействия между потоком охлаждающего воздуха и соприкасающейся с ним поверхностью корпуса СВЧ-модуля. Проведение такого исследования включает в себя как экспериментальное исследование, так и нахождение в конечном счёте уравнений, правильно описывающих процессы теплообмена [2].

Практический расчёт устройств с конвективным теплообменом чаще всего производят с использованием теории подобия и критериальных уравнений. Из системы уравнений, описывающих процесс конвективного теплообмена, можно получить за-

висимость между обобщёнными переменными в критериальных уравнениях [3]:

$$Nu = f(Re) \quad (1)$$

Число Рейнольдса Re , характеризующее отношение силы инерции к силе вязкостного трения, выражается следующим образом:

$$Re = \frac{VL}{\gamma}, \quad (2)$$

где V – скорость потока охлаждающего воздуха м/с; γ – коэффициент кинематической вязкости охлаждающей среды при температуре 50 °С составляет $19,64 \cdot 10^{-6}$ м²/с [4]; L – длина вдоль направления потока составляет 0,29 м.

Число Нуссельта Nu (критерий Нуссельта) характеризует интенсивность процесса теплообмена на границе «газ – омываемая поверхность». Эта величина представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи [5]:

$$Nu = \frac{a_k \cdot L}{\lambda_c}. \quad (3)$$

λ_c – теплопроводность охлаждающей среды. Теплопроводность воздуха при температуре 50 °С составляет 0,0277 Вт/м °С [4]; a_k – коэффициент теплоотдачи, Вт/м² °С.

Коэффициент теплоотдачи a_k рассчитывается по формуле [4]

$$a_k = \frac{Q_{рас}}{(T_{кор} - T_{воз})S_{\Sigma}}, \quad (4)$$

где $Q_{\text{рас}}$ – тепловой поток с охлаждаемой поверхности, численно равный рассеиваемой мощности модуля, Вт; S_{Σ} – общая площадь охлаждаемой поверхности составляла $0,52 \text{ м}^2$.

Необходимо отметить, что в настоящее время не существует единой общепринятой теории для достаточно точного расчёта подобных задач. Для инженерных расчётов конвективного теплообмена для воздуха в работе [5] предложены следующие выражения:

$$\text{Nu} = 0.57 \cdot \text{Re}^{0.5} \text{ для } \text{Re} < 4 \cdot 10^4 - \text{ для ламинарных режимов,} \quad (5)$$

$$\text{Nu} = 0.032 \cdot \text{Re}^{0.8} \text{ при } \text{Re} \geq 4 \cdot 10^4 - \text{ для турбулентных режимов.} \quad (6)$$

Однако применение уравнений (5) и (6) не всегда даёт требуемую точность. Ввиду сложности математического описания процессов конвективного теплообмена зависимость для конкретной задачи находится экспериментальным путём.

Зависимость между указанными критериями обычно представляется в виде степенных функций. Так, в [6] для вынужденного турбулентного потока предлагается критериальная зависимость в виде:

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^n, \quad (7)$$

где коэффициенты C и n (постоянные числа) находятся из опыта.

Целями данной работы являются:

– экспериментальное исследование процессов конвективного теплообмена при функционировании твердотельного СВЧ

модуля в тепловой камере с вынужденным охлаждением;

– нахождение опытным путём коэффициентов эмпирических критериальных уравнений и коэффициента теплоотдачи a_k ;

– проверка применимости полученных уравнений Нуссельта для другого типа СВЧ модулей.

Экспериментальное получение критериальных уравнений

В работе исследовался мощный твердотельный СВЧ модуль типа «УМИ-2800-800». Одной из задач являлось исследование температурного поля при различных режимах охлаждения модуля. Температура замерялась термопарами в трёх точках на теплоотводящей поверхности корпуса СВЧ модуля с регистрацией прибором ОВЕН ТРМ-138 при различных скоростях потока воздуха (в диапазоне скоростей от 2 до 12 м/с). Для расчёта коэффициента теплоотдачи a_k использовалась усреднённая температура корпуса T_k , рассчитанная как средняя по указанным трём замерам.

При этом рассеиваемая мощность модуля оставалась неизменной и составляла $Q_{\text{рас}} = 280 \text{ Вт}$. Значение мощности контролировалось в течение всего эксперимента.

Согласно техническим условиям (ТУ) на мощные СВЧ модули температура охлаждающего воздуха при испытаниях и эксплуатации не должна превышать $T_{\text{воз}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. Поток воздуха был направлен вдоль ребра L . При этом температура корпуса не должна превышать $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Схема контроля температурного поля модуля представлена на рис. 1.

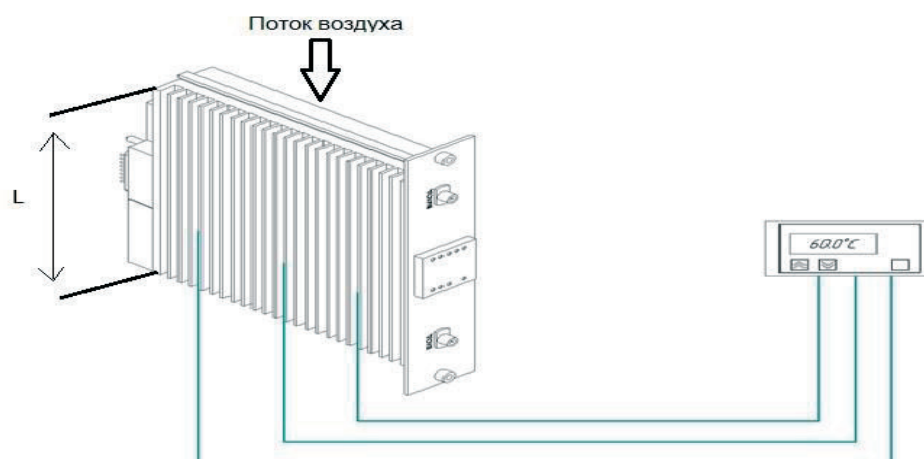


Рис. 1

Схема подключения термопар к СВЧ модулю

Скорость потока и температура охлаждающего воздуха замерялись на входе в канал ребра.

Результаты измерений приведены в таб-

лице. В ней также представлены результаты расчётов основных тепловых характеристик по формулам (2) – (4).

Таблица

Результаты расчётов основных тепловых характеристик

V , м/сек	Re	T_k , °C	a_k , Вт/м ² °C	Nu	lgRe	lgNu
2,70	39867	60,9	49,14	514	4,60	2,71
2,85	42082	60,4	51,51	539	4,62	2,73
3,01	44445	59,8	54,68	572	4,65	2,76
3,18	46955	59,5	56,42	590	4,67	2,77
3,35	49465	58,8	60,93	637	4,69	2,80
4,00	59063	57,0	76,67	802	4,77	2,90
4,60	67922	56,4	83,88	878	4,83	2,94
5,00	73828	56,0	89,49	936	4,87	2,97
6,00	88594	55,5	97,65	1022	4,95	3,01
7,00	103360	55,1	105,33	1102	5,01	3,04
8,00	118126	54,7	114,32	1196	5,07	3,08
9,00	132892	54,3	124,97	1308	5,12	3,12
10,50	155040	54,0	134,37	1406	5,19	3,15

По результатам обработки экспериментальных данных построена зависимость $\lg Nu$ от $\lg Re$ (рис. 2). Представленная зависимость может быть достаточно точно интерполирована линейной функцией.

Прологарифмировав уравнение (7) и обозначив $\lg Re$ через x , $\lg Nu$ через y и $\lg C$ через A , получим уравнение прямой: $y = A + nx$, при этом $A = y$ при $x = 0$, а $n = \operatorname{tg}\varphi$, где φ – угол наклона прямой оси к абсциссе. Определив значение n , определяем и значение константы C в формуле (7) как $C = 10^A$. Параметры линейной интерполяции A и n рассчитывались методом наименьших квадратов с помощью стандартных процедур обработки массива данных в программе Microsoft Excel.

Значение C оказалось равным 0.19 и

значение n оказалось равным 0,75. Таким образом, критериальное уравнение Нуссельта принимает вид:

$$Nu = 0.19Re^{0.75}. \quad (9)$$

Далее, учитывая соотношения (3), рассчитывается коэффициент теплоотдачи a_k и, наконец, определяем расчётное значение средней температуры охлаждаемой поверхности корпуса модуля [7]:

$$T_{\text{корп}} = \frac{Q_{\text{рас}}}{a_k S_{\Sigma}} + T_{\text{воз}}. \quad (10)$$

Для сравнения был также произведён расчёт температуры корпуса с использованием критериального уравнения (6). Результаты расчёта, а также экспериментально измеренные значения температуры

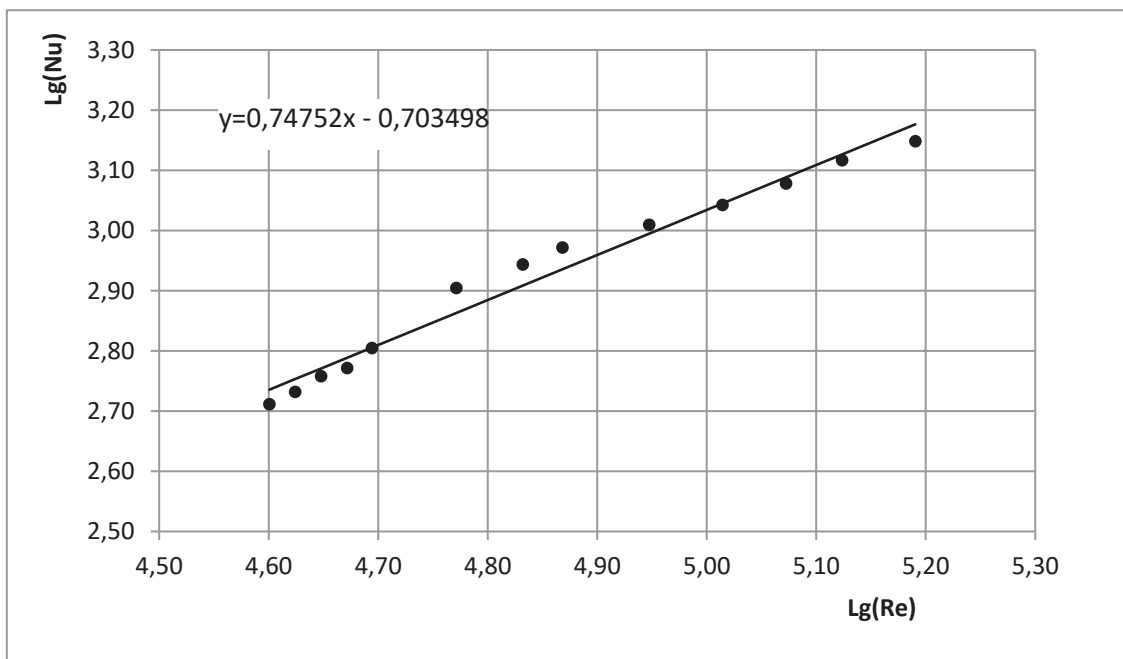


Рис. 2

Зависимость $\lg Nu$ от $\lg Re$:

• – экспериментальные точки, — — линейная интерполяция

поверхности корпуса при различных скоростях потока воздуха представлены на рис. 3.

температуры корпуса модуля с другой конфигурацией и мощностью (оценка применимости критериев подобия)

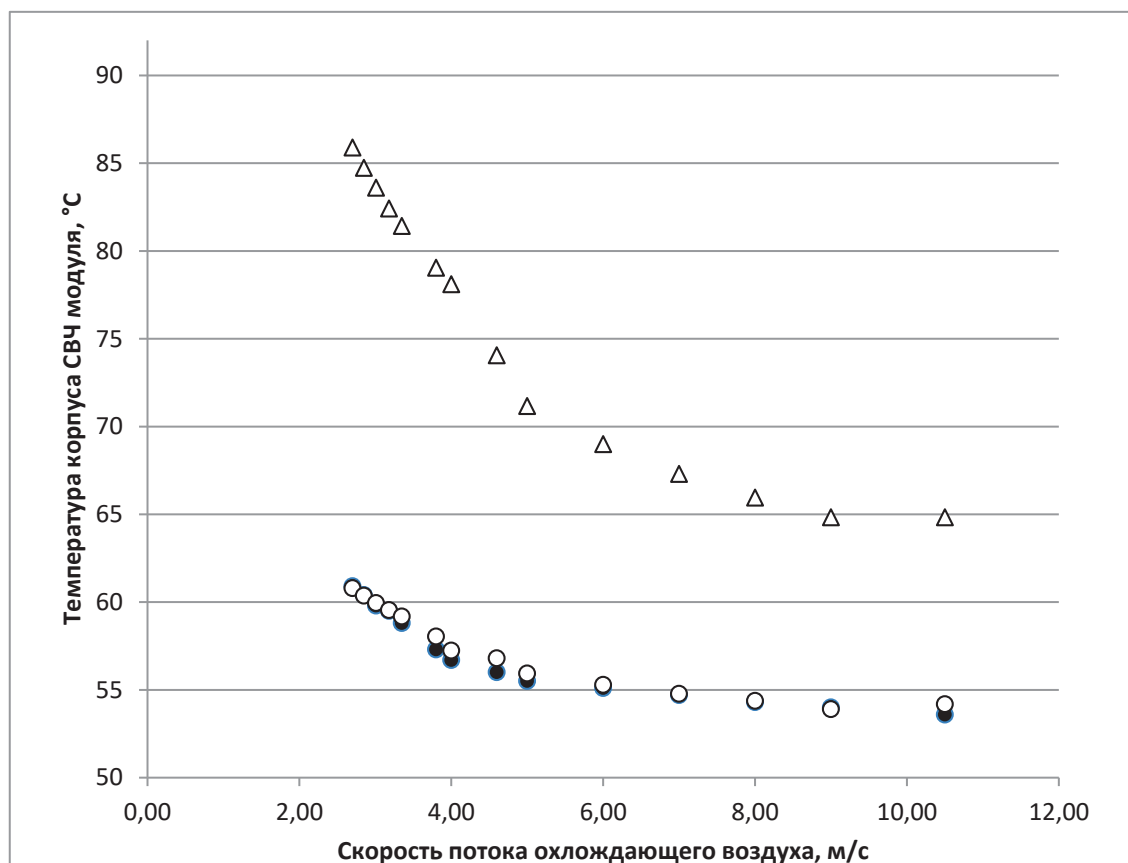


Рис. 3

Зависимость температуры корпуса от скорости потока воздуха модуля типа УМИ 2800-800: • – экспериментальные точки; ○ – расчётные значения, полученные с использованием критериального уравнения $Nu = 0,19Re^{0,75}$; Δ – расчётные значения, полученные с использованием критериального уравнения $Nu = 0,032Re^{0,8}$

При использовании критериального уравнения $Nu = 0,19Re^{0,75}$ расхождение мало (около 1 %). Оно может быть связано с погрешностью измерения температуры корпуса и приближением реальной зависимости линейной функцией. При использовании критериального уравнения $Nu = 0,032Re^{0,8}$ отклонение превышало 30 %.

Проверка применимости полученного уравнения Нуссельта для расчёта

Полученное критериальное уравнение Нуссельта $Nu = 0,19Re^{0,75}$ было применено для расчёта температуры поверхности корпуса мощного твердотельного СВЧ модуля типа «ППМ 1300-700», отличающегося размерами и рассеиваемой мощностью. Длина ребра модуля L составляла 0,42 м, а общая площадь охлаждаемой поверхности S_{Σ} составляла 0,60 м². Внешний вид модуля показан на рис. 4.



Рис. 4
Внешний вид СВЧ модуля типа
«ППМ 1300-700»

Температура замерялась в трёх точках на теплоотводящей поверхности корпуса по схеме, аналогичной ранее описанной при исследовании модуля «УМИ-2800-800», при скоростях потока воздуха от 4 до 9 м/с. При этом рассеиваемая мощность СВЧ модуля оставалась неизменной и составляла $Q_{\text{рас}} = 500$ Вт. Значение мощности контролировалось в течение всего эксперимента.

С помощью найденного критериального уравнения был произведён расчёт температуры корпуса. График зависимости температуры от скорости потока охлаждающего воздуха, а также экспериментально изме-

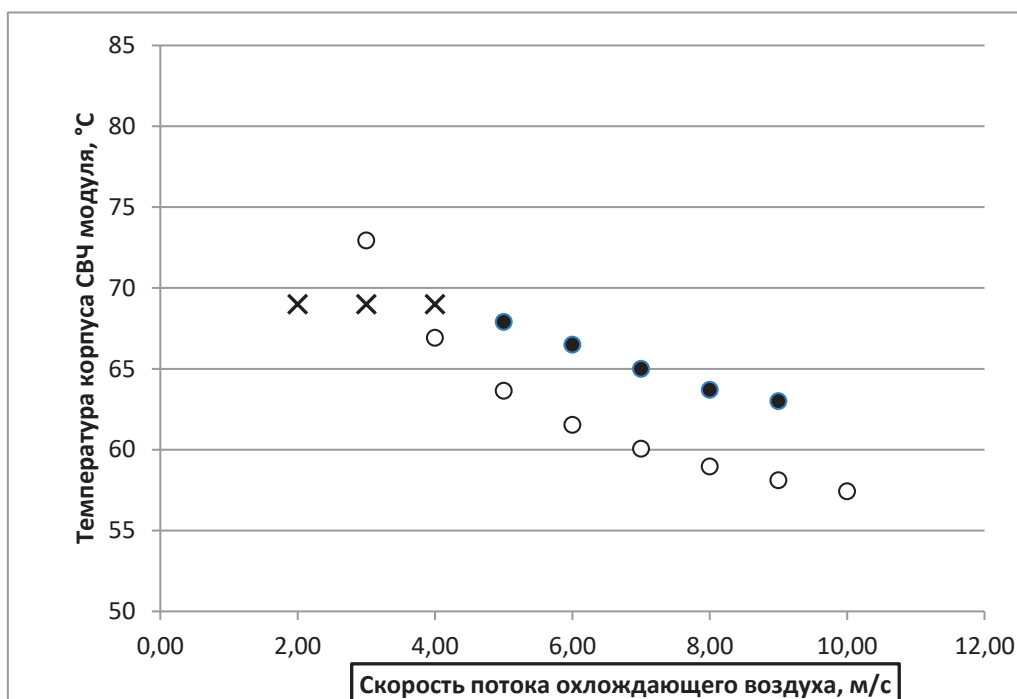


Рис. 5
Зависимость температуры поверхности корпуса от скорости потока воздуха для модуля типа ППМ 1300-700: • – экспериментально измеренные значения температуры; o – расчётные значения температуры, полученные при использовании уравнения $Nu = 0,19Re^{0,75}$; x – отказ СВЧ модуля (при скорости меньше 4 м/с вследствие перегрева корпуса срабатывает тепловая защита модуля)

ренные значения температуры поверхности корпуса представлены на рис. 5.

Расхождение экспериментальных и расчётных значений составляло от 4 до 10 %. Таким образом, показано, что экспериментальная модель критериального уравнения $Nu = 0,19Re^{0,75}$ применима и для других типов СВЧ модулей. Очевидно, что погрешность оценки температуры корпуса может быть существенно снижена адекватным выбором расчётных параметров, определяющих критерии подобия (в том числе характерных линейных размеров изделий).

Результаты исследования позволяют сделать выводы, что полученную критериальную зависимость можно использовать при проектировании автоматизированных камер конвективного теплообмена для испытаний подобных СВЧ модулей.

Заключение

Проведённое исследование температурных режимов 2-х типов активно функционирующих мощных СВЧ модулей в тепловой камере конвективного теплообмена показало, что при испытаниях в турбулентных режимах обдува воздушным потоком процесс теплообмена достаточно точно описывается критериальным уравнением Нуссельта $Nu = 0,19Re^{0,75}$.

Для оценки границ применимости полученного критериального уравнения для различных типов СВЧ модулей была проведена серия сравнительных экспериментов на модулях «УМИ-2800-800» и «ППМ 1300-700». Исследование показало удовлетворительное совпадение расчётной и замеренной температур корпуса для второго

типа модуля (с более высоким выделением мощности – 500 Вт).

Использование предложенной расчётной модели для описания тепловых процессов позволит на этапе разработки испытательного оборудования сократить время конструирования тепловых систем и обеспечить испытания изделий в заданных ТУ предельно допустимых режимах эксплуатации. Однако эффективное применение методов подобия опосредовано установлением более универсальных критериев подобия, физически адекватно описывающих конвективный теплообмен для модулей различных конфигураций. Поиск таких критериев и будет являться предметом дальнейших исследований.

Литература

1. РД В 319.02.24-99 Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы проведения отбраковочных испытаний РЭА на этапах разработки и производства. - 22 ЦНИИИ МО РФ, 1999.
2. Никитин, Л.Н. Испытания и диагностика телевизионных систем: испытания радиоэлектронной аппаратуры / Л.Н. Никитин: учеб. пособие. – Воронеж: Воронежский гос. техн. ун-т, 2009. – Режим доступ: <https://gigabaza.ru/doc/68517-pall.html>.
3. Кудинов, А.А. Тепломассообмен / А.А. Кудинов: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2012. – 375 с.
4. Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
5. Горбачев, М.В. Тепломассообмен / М.В. Горбачев: учеб. пособие. – Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т, 2014. – 443 с.
6. Луканин, В.Н. Теплотехника / В.Н. Луканин: учебник для студентов. – М.: Высшая школа, 2009. – 672 с.

7. Роткоп, Л.П. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры / Л.П. Роткоп, Ю.Е. Спокойный. – М.: Советское радио, 1976. – 232 с.
3. Kudinov A.A. Heat-and-Mass Transfer. – Moscow: INFARA-M Publ., 2012. – 375 p.
4. Mikheev M.A., Fundamentals of Heat Transfer. – Moscow : Energiya Publ., 1977. – 344 p.
5. Gorbachev M.V. Heat-and-Mass Transfer. Novosibirsk. – Novosibirsk: State Technical University Publ., 2014. – 443 p.
6. Lukanin V.N. Thermal Engineering: A textbook for students of engineering profession. – Moscow: Vyshaya Skhola Publ., 2009. – 672 p.
7. Rotkop L.P., Spokoyniy Yu.E.. Providing Thermal Conditions in the Design of Radio-electronic Equipment. – Moscow: Sov.Radio Publ., 1976. – 232 p.

References

1. Russian Federation State Guideline Document Mil / GOST RD V 319.02.24-99. Military equipment, instruments, devices. Screening test methods.
2. Nikitin L.N. Radio-electronic Equipment Testing. – Voronezh: Voronezh State Technical University Publ., 2009. – URL: <https://gigabaza.ru/doc/68517-pall.html>.