

Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 8, №2 (2016) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol8-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN216.pdf>

DOI: 10.15862/26TVN216 (<http://dx.doi.org/10.15862/26TVN216>)

Статья опубликована 04.04.2016.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Измайлов В.В., Чаплыгин С.А. Электротепловая аналогия и расчет проводимости дискретного контакта деталей машин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 8, №2 (2016)  
<http://naukovedenie.ru/PDF/26TVN216.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI:  
10.15862/26TVN216

**УДК 536.24**

**Измайлов Владимир Васильевич**

ФГБОУ ВО «Тверской государственный технический университет», Россия, Тверь<sup>1</sup>  
Профессор  
Доктор технических наук  
E-mail: [iz2v@tvcom.ru](mailto:iz2v@tvcom.ru)

**Чаплыгин Сергей Андреевич**

ООО «Нефтегазгеофизика», Россия, Тверь  
Инженер-технолог  
E-mail: [chaplygin-sergey@mail.ru](mailto:chaplygin-sergey@mail.ru)

## **Электротепловая аналогия и расчет проводимости дискретного контакта деталей машин**

**Аннотация.** С помощью разработанной числовой модели дискретного контакта реальных технических поверхностей, имеющих отклонения от идеальной геометрической формы, рассчитаны электрическое и термическое сопротивления контакта. Исходными данными для расчета являются параметры микрогеометрии контактирующих поверхностей (максимальная высота неровностей профиля, максимальный радиус закругления вершин неровностей, статистические функции распределения этих величин); механические характеристики материалов контактирующих деталей (микротвердость, модуль упругости, коэффициент Пуассона); физические характеристики материалов контактирующих деталей (удельное электросопротивление, коэффициент теплопроводности, число Лоренца, температура плавления материалов); а также эксплуатационные параметры контакта (средняя температура контакта, сжимающая сила, номинальная площадь контакта, межконтактная среда).

Результаты моделирования представлены в виде зависимостей электрического и термического контактных сопротивлений (проводимостей) от нормального давления (нагрузки) в сопоставлении с экспериментальными результатами. Сопоставление показало хорошую сходимость расчетных и экспериментальных значений сопротивлений (проводимостей).

Обоснована возможность применения так называемой электротепловой аналогии для оценки термической проводимости (сопротивления) контакта по величине электрической

---

<sup>1</sup> 170026, г. Тверь, наб. Аф. Никитина, 22, ТвГТУ

проводимости (сопротивления). Поскольку определение электрических характеристик контакта намного проще технически, чем соответствующих тепловых характеристик, такая методика значительно упрощает оценку последних.

**Ключевые слова:** числовая модель; дискретный контакт; микрогеометрия поверхностей; электрическое сопротивление; термическое сопротивление; проводимость контакта; электротепловая аналогия

### Введение

Данной публикацией авторы продолжают описание результатов числового моделирования дискретного контакта деталей машин и показывают возможности применения описанной в работе [1] модели к расчету электрической и термической контактных проводимостей. Дискретность контакта приводит к возникновению дополнительных по сравнению с объемными электрического и термического сопротивлений, которые в значительной степени определяются величиной фактической площади контакта и его деформацией [1]. Именно фактическая площадь контакта определяет реальную величину плотности потока тепла или электрического заряда, а от величины контактной деформации зависит объем межконтактного пространства.

Аналитическое описание процессов контактного тепло- и электропереноса содержится в достаточно большом количестве работ [2, 3, 4, 5, 6]. Вместе с тем, числовое моделирование дополняет и уточняет аналитическое описание контактных процессов, так как позволяет учесть особенности контактирования отдельных выступов, не прибегая к усреднению характеристик контактного взаимодействия по ансамблю.

Математическое описание процессов тепло- и электропроводности твердых тел вообще и их дискретного контакта в частности имеет много общего. Это дает основание говорить о так называемой электротепловой аналогии [7] и использовать ее в описании процессов тепло- и электропереноса, в том числе в различные рода контактных соединениях, широко распространенных в технике. В то же время, в ряде случаев имеются и довольно существенные различия в природе и описании этих процессов. Все эти обстоятельства обсуждаются в данной статье.

Целью данной статьи является демонстрация возможностей числового моделирования дискретного контакта деталей машин для расчета его термической и электрической проводимости и проверка адекватности разработанной модели, а также проверка возможности использования электротепловой аналогии в таких расчетах.

### Электротепловая аналогия

Процесс переноса тепловой энергии описывается уравнением Фурье

$$\vec{q} = -\lambda \text{grad}T, \quad (1)$$

где:  $q$  – плотность теплового потока,  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности (или просто теплопроводность) среды,  $T$  – температура.

Процесс переноса электрического заряда (электрический ток) описывается законом Ома

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}, \quad (2)$$

где:  $j$  – плотность тока,  $\gamma$  – электрическая проводимость среды,  $E$  – напряженность электрического поля. Если учесть, что  $\vec{E} = -\text{grad}\varphi$ , то из уравнения (2) получаем

$$\vec{j} = -\gamma \text{grad}\varphi, \quad (3)$$

т.е. уравнение, полностью идентичное уравнению (1).

В простейшем случае потока тепла через бесконечную однородную пластину (стенку) толщиной  $h$ , на поверхностях которой поддерживаются постоянные температуры  $T_1$  и  $T_2$  ( $T_1 > T_2$ ) уравнение (1) примет вид

$$q = \lambda \frac{(T_1 - T_2)}{h}, \quad (4)$$

или

$$q = \frac{\lambda}{h} \Delta T, \quad (5)$$

где  $\Delta T = (T_1 - T_2)$  – контактный перепад температур, величину  $\frac{\lambda}{h} = C_T$  называют коэффициентом теплопроводности, теплопроводностью или термической проводимостью пластины (стенки), а обратную величину  $R_T = \frac{h}{\lambda}$  – термическим сопротивлением пластины (стенки). Её размерность, как нетрудно видеть, ( $\text{м}^2\text{К/Вт}$ ).

Для переноса электрического заряда через участок бесконечной однородной пластины площадью  $S$  и толщиной  $h$  перпендикулярно ее поверхности из уравнения (3) получаем

$$j = \frac{I}{S} = \gamma \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{h},$$

или

$$I = \frac{\gamma S}{h} U = G_3 U, \quad (6)$$

т.е. известный закон Ома в интегральной форме, где  $I$  – сила тока,  $U = \varphi_1 - \varphi_2$  – электрическое напряжение,  $G_3 = \frac{\gamma S}{h}$  – электрическая проводимость. Обратную величину  $R_3 = \frac{1}{G_3} = \frac{h}{\gamma S} = \frac{\rho h}{S}$  называют электрическим сопротивлением, а величину  $\rho = 1/\gamma$  – удельным электросопротивлением.

Таким образом, сложилось некоторое несоответствие понятий электрическое и термическое сопротивления. Если под термическим сопротивлением чаще всего подразумевают удельную величину, относящуюся к единице площади и характеризующую плотность теплового потока, то под электрическим сопротивлением чаще всего понимают интегральную величину, характеризующую весь поток (электрический ток), а не его плотность. Это обстоятельство важно помнить во избежание недоразумений при использовании электротепловой аналогии в расчетах соответствующих сопротивлений или проводимостей, в том числе контактных.

Разумеется, уравнение (5) можно записать в интегральном виде (аналогично уравнению (6))

$$Q = qS = C_T S \Delta T = G_T \Delta T = \Delta T / R_{Tп},$$

где  $Q$  – величина потока тепловой энергии, (передаваемая тепловая мощность),  $G_T = C_T S$  – полная (абсолютная) термическая проводимость. Обратную величину  $R_{Tп}$  с размерностью ( $\text{К/Вт}$ ) называют полным или абсолютным термическим сопротивлением [3]. На практике эта величина используется реже, чем введенная выше величина  $R_T$ .

И наоборот, уравнение (6) можно записать в виде, аналогичном уравнению (5)

$$j = \frac{I}{S} = \frac{G_0 U}{S} = \sigma U, \quad (7)$$

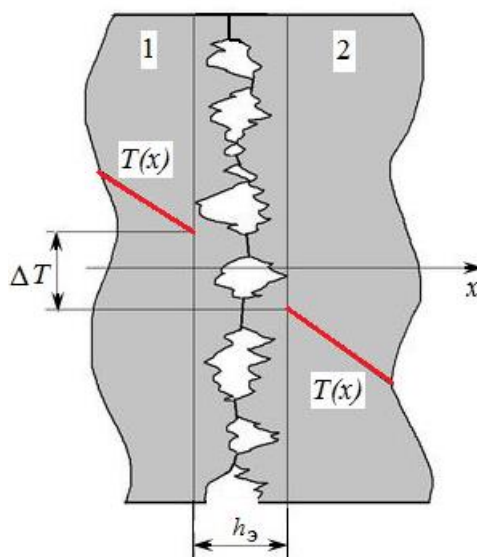
где  $\sigma = G_0/S$  – электрическая проводимость единицы площади с размерностью  $1/(\text{Ом}\cdot\text{м}^2)$  или  $(\text{См}/\text{м}^2)$ . На практике эта величина практически не используется, как и уравнение (7). Единственным исключением, пожалуй, является расчет туннельной или надбарьерной проводимости МДМ (металл-диэлектрик-металл) или МДП (металл-диэлектрик-полупроводник) структур, в том числе и металлических контактов с оксидными пленками [4, 8].

Помимо чисто математической аналогии (см. уравнения (1) и (3)), существует и физическая аналогия процессов тепло- и электропереноса. В металлах, как известно, перенос тепла осуществляется за счет двух механизмов – электронного и фононного, причем во многих случаях электронная проводимость намного больше фононной. Носителями электрического заряда в металлах являются свободные электроны, т.е. те же частицы, которые обуславливают в основном перенос тепла. Следствием этого обстоятельства является закон Видемана – Франца

$$\frac{\lambda}{\gamma} = \lambda\rho = LT, \quad (8)$$

где  $L$  – число Лоренца. Теоретически  $L = \frac{\pi^2}{3} \left(\frac{k_B}{e}\right)^2 \approx 2.45 \cdot 10^{-8} (\text{В}/\text{К})^2$ , где  $k_B$  – постоянная Больцмана,  $e$  – заряд электрона. В действительности число Лоренца может отличаться от теоретического значения, но остается гораздо более статистически устойчивой величиной, чем тепло- и электропроводность в отдельности. Так, для чистых металлов при комнатной температуре  $L = (2,1 \div 3,8) \cdot 10^{-8} (\text{В}/\text{К})^2$ , для всех типов сталей при  $100^\circ\text{C}$   $L = (2,1 \div 3,8) \cdot 10^{-8} (\text{В}/\text{К})^2$ .

Если перейти к процессам переноса в контактных соединениях, можно условно считать контактный слой некоторой пластиной с эквивалентной толщиной  $h_3$  (рис. 1).



<sup>2</sup> Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике: справочник. – М.-Л.: Энергия, 1967. – 240 с.

**Рисунок 1.** Схема контакта двух шероховатых поверхностей.  $\Delta T$  – контактный перепад температур. Поток тепла идет в положительном направлении оси  $x$

Используя полученные выше результаты, можно записать для контактного термического сопротивления  $R_T = h_3/\lambda$ , а для электрического сопротивления  $R_3 = \rho h_3/A_n$ , где  $A_n$  – номинальная (геометрическая) площадь контакта. Найдем отношение  $R_T/R_3$

$$\frac{R_T}{R_3} = \frac{h_3 A_n}{\lambda \rho h_3} = \frac{A_n}{\lambda \rho},$$

или, с учетом (8),

$$\frac{R_T}{R_3} = \frac{A_n}{LT}. \quad (9)$$

Таким образом, зная электрическое сопротивление контакта, можно оценить его термическое сопротивление. Дело в том, что экспериментально измерение электрического сопротивления гораздо проще, чем термического. Однако следует учитывать, что уравнение (9) не всегда применимо в силу ряда обстоятельств, о которых речь пойдет ниже.

Одним из таких обстоятельств является наличие физически и химически адсорбированных слоев, например, оксидных пленок, на поверхности твердых тел. Их термическое сопротивление обычно пренебрежимо мало, тогда как электрическое сопротивление может быть весьма существенным. Вторым обстоятельством является наличие межконтактной среды, заполняющей зазор между контактирующими поверхностями. Чаще всего, это диэлектрики, поэтому в электрическую проводимость контакта они не вносят существенного вклада, чего нельзя сказать о термической проводимости. Наконец, перенос тепла в контакте может осуществляться излучением, тогда как в переносе электрического заряда такой механизм отсутствует. Однако при средней температуре в зоне контакта менее 1000 К этот механизм теплопереноса также можно не учитывать [3].

Оптимальным случаем для применения электротепловой аналогии является функционирование контактного соединения в вакууме. Тепловая проводимость среды в этом случае пренебрежимо мала (в идеале отсутствует за отсутствием среды), так же, как и электрическое сопротивление адсорбированных слоев ввиду низкой концентрации (в идеале опять-таки отсутствия) адсорбтива. В этом случае основной составляющей как термического, так и электрического сопротивлений является так называемое сопротивление стягивания линий тока (электрического или теплового) к площадкам фактического контакта сопряженных поверхностей.

### Электрическое сопротивление дискретного контакта

Иллюстрацию возможностей разработанной числовой модели дискретного контакта и проверку ее адекватности выполним на примере расчета контактного электрического сопротивления вакуумных дугогасительных камер [9].

В вакууме сопротивление контакта обусловлено стягиванием линий электрического тока к площадкам фактического контакта неровностей контактирующих шероховатых поверхностей (т.н. сопротивление стягивания). Расчет сопротивления стягивания к  $i$ -й площадке контакта в обсуждаемой модели дискретного контакта производится по известной формуле Р. Хольма [8]

$$R_{3i} = \frac{\rho_1 + \rho_2}{4a_i},$$

где  $\rho_1$  и  $\rho_2$  – удельные сопротивления материалов контактирующих деталей,  $a_i$  – радиус площадки. Затем находится общее сопротивление контакта [1].

$$R_3 = \frac{1}{\sum_1^{n_r} \frac{1}{R_{3i}}},$$

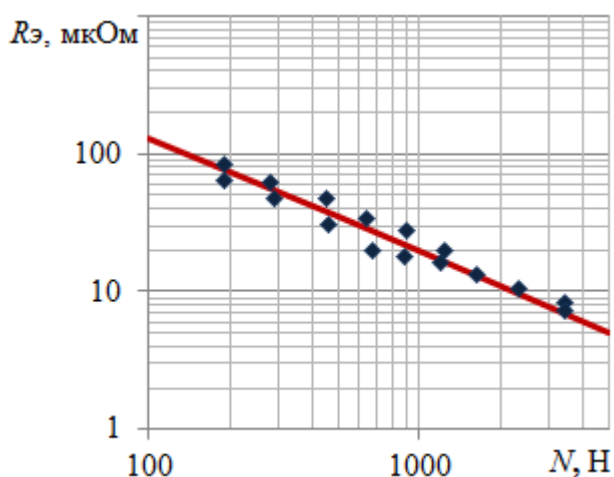
где  $n_r$  – число площадок фактического контакта.

Исходными данными для расчета являются физико-механические характеристики материалов контактирующих деталей и параметры микрогеометрии их поверхностей, которые приведены в таблице 1.

**Таблица 1**

**Исходные данные для расчета электрического сопротивления контакта**

Физико-механические характеристики			Геометрические характеристики		
$\rho$ , Ом·м	$E$ , ГПа	$H$ , МПа	$R_p$ , мкм	$r_{max}$ , мм	$A_n$ , см <sup>2</sup>
$7,5 \cdot 10^{-8}$	170	1900	28	4	6,15
$\rho$ – удельное электросопротивление, $E$ – модуль упругости, $H$ – твердость, $R_p$ – максимальная высота выступов профиля, $r_{max}$ – максимальный радиус закругления вершин выступов, $A_n$ – номинальная площадь контакта					



**Рисунок 2.** Зависимость контактного электрического сопротивления  $R_э$  от нагрузки  $N$ . Линия – расчет по предложенной модели, точки – экспериментальные значения [9]

На рис. 2 представлено сравнение расчетных значений контактного электросопротивления с экспериментальными [9]. Совпадение экспериментальных значений с расчетными по предложенной модели даже лучше, чем с результатами аналитического расчета электросопротивления контакта, приведенными в работе [9]. Это дает основание считать разработанную модель адекватной и использовать ее для расчета термического сопротивления контакта с помощью электротепловой аналогии.

### Термическое сопротивление дискретного контакта в вакууме

Для проверки возможности использования формулы (9) для расчета термического сопротивления контакта воспользуемся результатами работы [10], в которой приведены таблицы экспериментальных значений  $R_T$  и, что в данном случае очень важно, параметры микрогеометрии контактирующих поверхностей. На основании этих параметров с помощью разработанной численной модели дискретного контакта и формулы (9) рассчитывали значения контактного термического сопротивления и сравнивали эти результаты с экспериментальными значениями. Еще раз подчеркнем, что расчет величины  $R_T$  проводился именно на основании формулы (9), т.е. сначала с помощью модели рассчитывали электрическое сопротивление контакта  $R_э$ , а уже на основании этих значений рассчитывали термическое сопротивление контакта. Разумеется, не составляло никакого

Для проверки возможности использования формулы (9) для расчета

труда с помощью той же модели непосредственно рассчитать значения  $R_T$ , однако нашей задачей была именно проверка возможности использования электротепловой аналогии, т.е. формулы (9).

Исходные данные для расчета приведены в таблице 2.

**Таблица 2**

**Исходные данные для расчета термического сопротивления контакта**

№	Материал	Физико-механические характеристики				Геометрические характеристики		Условия эксперимента	
		$\rho$ , мкОм·м	$L$ , $10^{-8}$ В <sup>2</sup> /К <sup>2</sup>	$E$ , ГПа	$H$ , МПа	$Rz$ , мкм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	Межконтактная среда	Средняя температура контакта, К
1	Сталь 12Х13	0,724	3,8	200	2150	3,1	1256	Вакуум 0,133 Па	523
2	Сталь 45	0,354	3,3	192	1850	3,0			
3	Сталь 45	0,354	3,3	192	1850	14,7			

$L$  – число Лоренца,  $Rz$  – средняя высота неровностей профиля. Остальные обозначения те же, что в таблице 1

Сопоставление расчетных и экспериментальных значений контактного термического сопротивления представлено на рис. 3. Можно констатировать разумное соответствие результатов расчета термического сопротивления с использованием электротепловой аналогии и экспериментальных значений и на этом основании считать возможным применение уравнения (9) в расчетах процессов контактного теплообмена.

Для большей убедительности такого заключения приведем сопоставление результатов расчета контактного термического сопротивления по предложенной нами методике с экспериментальными результатами из другого источника [11]. Исходные данные для расчета в соответствии с работой [11] приведены в таблице 3. В отличие от работы [10], в которой исследовались контактные пары из двух одинаковых материалов, в статье [11] описаны эксперименты с контактными парами из различных материалов, конкретно пара алюминиевый сплав – титановый сплав. Поэтому в таблице 3 приведены характеристики каждого из контактирующих материалов, за исключением твердости, так как в расчетах по предложенной авторами модели используется твердость менее твердого материала, в данном случае алюминиевого сплава.

Поскольку в статье [11] приведены зависимости полной (абсолютной) термической проводимости  $G_T$  (Вт/К) (см. выше), с помощью модели дискретного контакта также рассчитывалась именно эта величина, которая и сопоставлялась с экспериментальными данными работы [11]. Результаты сопоставления приведены на рис. 4. Снова можно отметить неплохое соответствие расчетных и экспериментальных значений термической проводимости.

**Таблица 3**

**Исходные данные для расчета термической проводимости контакта**

№	Материал	Физико-механические характеристики				Геометрические характеристики		Межконтактная среда
		$\rho$ , мкОм·м	$L$ , $10^{-8}$ В <sup>2</sup> /К <sup>2</sup>	$E$ , ГПа	$H$ , МПа	$Rp_{\text{экв}}$ , мкм	$A_n$ , мм <sup>2</sup>	
1	Алюминиевый сплав	0,048	2,3	70	430	30	490	Вакуум ~ 10 <sup>-2</sup> Па
	Титановый сплав	1,72	3,3	110	-			
2	Алюминиевый сплав	0,048	2,3	70	430	7		
	Титановый сплав	1,72	3,3	110	-			

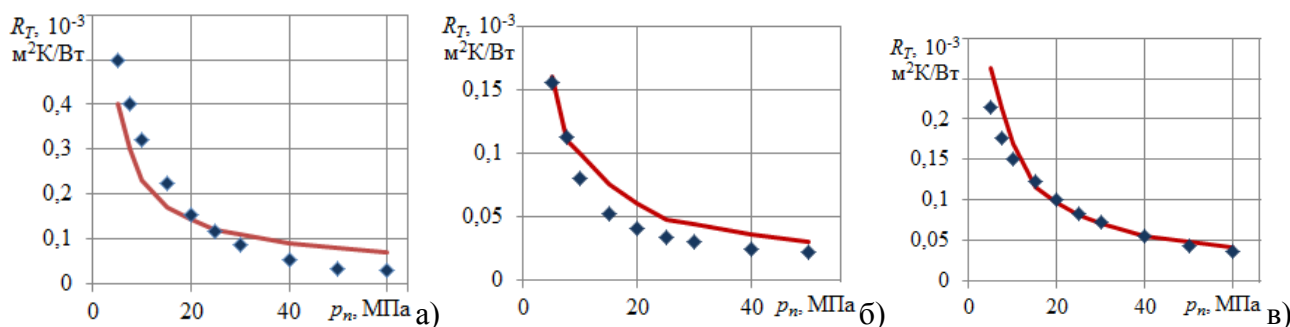
$Rp_{\text{экв}}$  – эквивалентное значение параметра  $Rp$ , характеризующее шероховатость двух контактирующих поверхностей [11]

**Безразмерные соотношения для термической проводимости и термического сопротивления контакта**

Для придания большей общности результатам расчетов термического сопротивления контакта целесообразно представить их в безразмерной (критериальной) форме, как это принято в теории теплообмена вообще и при описании контактного теплообмена в частности.

В зарубежной литературе выражения для безразмерной термической проводимости контакта  $C_T^* = C_T Rq / \lambda$  обычно имеют вид (с небольшими вариациями)

$$C_T^* = K \text{tg} \vartheta \left( \frac{p_n}{H} \right)^m, \quad (10)$$



**Рисунок 3.** Зависимость контактного термического сопротивления от номинального контактного давления  $p_n = N/A_n$ : а – контакт №1, б – контакт №2, в – контакт №3 (табл. 2)  
Линия – расчет по электротепловой аналогии (формула (9)),  
точки – экспериментальные результаты [10]

где  $Rq$  – среднее квадратическое отклонение профиля шероховатой поверхности,  $K$  и  $m$  – числовые коэффициенты,  $\text{tg} \vartheta$  – средний тангенс угла наклона неровностей шероховатости,  $H$  – твердость (микротвердость) наименее твердой поверхности. Безразмерный комплекс  $(p_n/H)$  характеризует степень механической нагруженности контакта, а параметр  $\text{tg} \vartheta$  – форму неровностей шероховатой поверхности (степень «гладкости» поверхности). Величины параметра  $m$  по литературным данным в большинстве случаев имеют значения в интервале  $0,67 \div 0,80$ , хотя иногда возможны и существенные отклонения от указанных границ.

В соответствии с разработанной нами моделью дискретного контакта мы предлагаем аналогичные безразмерные соотношения:

для безразмерной проводимости  $C_T^* = C_T R p / \lambda$

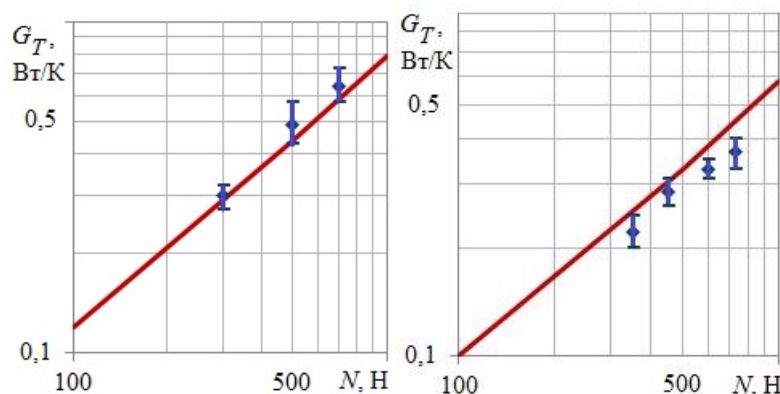


$$C_T^* = K \sqrt{\frac{Rp}{r_{max}}} \left(\frac{p_n}{H}\right)^m, \quad (11)$$

соответственно для безразмерного термического сопротивления  $R_T^* = R_T \lambda / Rp$

$$R_T^* = K^{-1} \sqrt{\frac{r_{max}}{Rp}} \left(\frac{p_n}{H}\right)^{-m}.$$

Безразмерный комплекс  $\sqrt{\frac{Rp}{r_{max}}}$  характеризует степень «гладкости» поверхности и ориентировочно связан с параметром  $\text{tg}\vartheta$ :  $\sqrt{\frac{Rp}{r_{max}}} \approx \sqrt{2} \text{tg}\vartheta$ , а параметры  $Rp$  и  $Rq$  также ориентировочно связаны зависимостью  $Rp \approx 2,5 Rq$ .



**Рисунок 4.** Зависимость полной термической проводимости контакта от нормальной нагрузки: а – контакт №1, б – контакт №2 (табл. 3)

Линия – расчет с помощью модели по электротепловой аналогии, точки – экспериментальные результаты [11]

Величины коэффициентов  $K$  и  $m$  для контактных пар, представленных в табл. 2 приведены в таблице 4. Коэффициенты получены обработкой методом наименьших квадратов результатов расчета контактного термического сопротивления в соответствии с предложенной моделью. В таблице 4 приведены также значения коэффициента корреляции, характеризующие степень соответствия значений термической проводимости, полученных в результате расчета на модели контакта, степенной зависимости (11). Как видим, соответствие исключительно высокое.

**Таблица 4**

**Коэффициенты зависимости безразмерной контактной термической проводимости от относительного контактного давления по уравнению (11)**

№	Материал	$K$	$m$	Коэффициент корреляции
1	Сталь 12X13	0,72	0,70	0,998
2	Сталь 45	0,91	0,72	0,998
3	Сталь 45	0,76	0,76	0,999

В заключение этого раздела нельзя не отметить, что безразмерная термическая проводимость контакта  $C_T^* = C_T Rp / \lambda$  по своей форме является аналогом известного критерия Нуссельта  $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ , где  $\alpha = q / \Delta T$  – коэффициент теплообмена,  $l$  – характерный размер.

### Проводимость межконтактного зазора

Наш анализ методики расчета контактной термической проводимости (сопротивления) был бы неполным, если бы мы не обсудили расчет термической проводимости межконтактного зазора. Этот вопрос актуален для контактных соединений, эксплуатирующихся в жидкой или газовой среде. Электротепловая аналогия здесь неприменима, так как ничего аналогичного закону Видемана-Франца для таких сред не существует.

Разработанная нами модель дискретного контакта позволяет рассчитать термическое сопротивление межконтактного зазора  $R_{Tg}$  по формуле

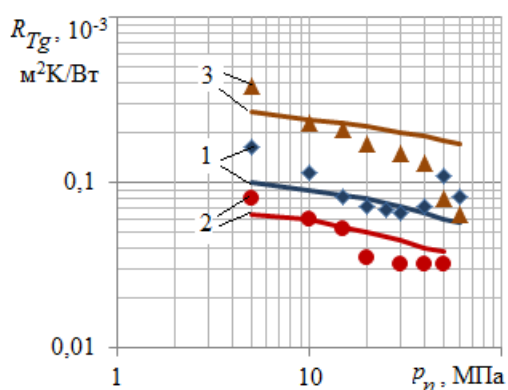
$$R_{Tg} = \frac{d_{gз}}{\lambda_c}, \quad (12)$$

где  $d_{gз}$  – эквивалентная толщина зазора (не путать с  $h_z$  на рис. 1),  $\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности среды. Эквивалентная толщина зазора определяется по формуле [12]

$$d_{gз} = Rp - \delta,$$

где  $\delta$  – деформация контакта под действием сжимающей нагрузки (сближение контактирующих поверхностей). Предложенная нами модель контакта позволяет рассчитать эту величину в зависимости от механических свойств материалов контактирующих деталей, параметров микрогеометрии поверхностей и приложенной сжимающей нагрузки [1], а затем, по формуле (12), величину термического сопротивления зазора.

Данные работы [10] дают возможность сопоставить результаты такого расчета с экспериментальными величинами сопротивления зазора, так как в этой работе приводятся значения контактных термических сопротивлений одних и тех же пар в вакууме и в различных газовых средах. Вычитая из проводимости контакта в среде проводимость в вакууме, находим проводимость межконтактного зазора, затем находим его сопротивление как величину, обратную проводимости.



**Рисунок 5.** Зависимость термического сопротивления межконтактного зазора от номинального контактного давления. Цифры на графике соответствуют номерам контактных пар в табл. 2. Линии – результат расчета с помощью предложенной модели, точки - экспериментальные результаты

В качестве примера такого сопоставления на рис. 5 представлены экспериментальные и расчетные значения термического сопротивления межконтактного зазора для контактных пар, характеристики которых приведены в табл. 2. Сравнение рис. 3 и рис. 5 свидетельствует о том, что термическое сопротивление межконтактного зазора сравнимо по величине с сопротивлением стягивания контакта, следовательно, методика его расчета должна быть составной частью общей методики расчета контактного термического сопротивления и учитываться в соответствующих моделях дискретного контакта, предназначенных для такого расчета.

### Заключение

Сравнение результатов расчета электрического и термического

сопротивлений дискретного контакта деталей машин с помощью разработанной авторами числовой модели контакта с экспериментальными результатами свидетельствует о достоверности расчетов и адекватности модели. Результаты моделирования иллюстрируют влияние параметров микрогеометрии контактирующих поверхностей и физико-механических характеристик материалов деталей на электрическое и термическое сопротивление контакта, а также подтверждают возможность использования электротепловой аналогии в вопросах контактной проводимости. Это важно с той точки зрения, что позволяет косвенно оценивать термическое сопротивление контакта по величине его электрического сопротивления, измерить которое на практике гораздо проще, чем непосредственно измерить термическое сопротивление.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Измайлов В.В., Чаплыгин С.А. Числовое и аналитическое моделирование дискретного контакта деталей машин // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» 2014. №6. <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/10TVN614.
2. Мышкин, Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М. Браунович. – Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2008. – 560 с.
3. Меснянкин, С.Ю. Современный взгляд на проблемы теплового контактирования твердых тел / С.Ю. Меснянкин, А.Г. Викулов, Д.Г. Викулов // Успехи физических наук. – 2009, т. 179, №9. – С. 945 – 970.
4. Измайлов, В.В. Контакт твердых тел и его проводимость: монография / В.В. Измайлов, М.В. Новоселова. - Тверь: ТвГТУ, 2010. – 112 с.
5. Иванов, А.С. Термическая проводимость плоского стыка / А.С. Иванов, В.В. Измайлов // Вестник машиностроения. - 2009, №7. - С. 41-43.
6. Yovanovich, M.M. Thermal Spreading and Contact Resistance / M.M. Yovanovich, E.E. Marotta // Heat Transfer Handbook, chapt. 4. – New York: Wiley, 2003. – p. 261 – 393.
7. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
8. Holm, R. Electric Contacts / R. Holm. – Berlin e.a.: Springer-Verlag, 1967. - 484 p.
9. Измайлов, В.В. Методика расчета переходного сопротивления контактов вакуумных дугогасительных камер / В.В. Измайлов, Н.И. Клешнин, С.А. Федеряев // Известия ВУЗов. Электромеханика. – 1990, №11. – с. 5 – 9.
10. Миллер, В.С. Контактный теплообмен в элементах высокотемпературных машин / В.С. Миллер. – Киев: Наукова думка, 1966. – 164 с.
11. O’Callaghan, P.W. Alleviating Thermal Resistance of Thermally Distorted Pressed Contacts / P.W. O’Callaghan, S.D. Probert // Proc. Inst. Mech. Engrs. Part C. Mech. Eng. Sci. – 1987, V. 201, No. C6. – P. 421 – 426.
12. Демкин, Н.Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.

**Izmailov Vladimir Vasilievich**  
Tver State Technical University, Russia, Tver  
E-mail: [iz2v@tvcom.ru](mailto:iz2v@tvcom.ru)

**Chaplygin Sergey Andreevich**  
Neftegazgeofizika, Ltd., Russia, Tver  
E-mail: [chaplygin-sergey@mail.ru](mailto:chaplygin-sergey@mail.ru)

## **Electrothermal analogy and the calculation of the conductivity of machine parts discrete contact**

**Abstract.** The developed numerical model of a discrete contact of real engineering surfaces with perfect geometrical form deviations was used for the calculation of electrical and thermal contact resistances. The input data for the calculation are as follows: the parameters of microgeometry of contact surfaces (maximal profile asperities height, maximal radius of asperities top curvature, statistical distribution functions of aforesaid values); mechanical properties of contact parts materials (microhardness, elastic modulus, Poisson's ratio); physical characteristics of contact parts materials (specific electrical resistance, thermal conductivity, Lorentz number, melting points of materials) as well as working conditions of contact (average contact temperature, compression load, nominal contact area, interfacial medium).

The results of simulation are presented in the form of dependences of electrical and thermal contact resistances (conductivities) on normal pressure (load) in comparison with experimental data. The comparison shows the good correspondence of theoretical and experimental values of resistances (conductivities).

The possibility of an application of so called electrothermal analogy for the estimation of a thermal contact resistance on the base of electrical one has been substantiated. As far as the estimation of electrical characteristics of contact is much simpler technologically than that of corresponding thermal ones, the method like this considerably simplifies an estimation of the latter.

**Keywords:** numerical model; discrete contact; surface microgeometry; electrical resistance; thermal resistance; contact conductivity; electrothermal analogy

## REFERENCES

1. Izmaylov V.V., Chaplygin S.A. Chislovoe i analiticheskoe modelirovanie diskretnogo kontakta detaley mashin // Internet-zhurnal «NAUKOVEDENIE» 2014. №6. <http://naukovedenie.ru/PDF/10TVN614.pdf> (dostup svobodnyy). Zagl. s ekrana. Yaz. rus., angl. DOI: 10.15862/10TVN614.
2. Myshkin, N.K. Elektricheskie kontakty / N.K. Myshkin, V.V. Konchits, M. Braunovich. – Dolgoprudnyy: Izdatel'skiy Dom «Intellect», 2008. – 560 s.
3. Mesnyankin, S.Yu. Sovremennyy vzglyad na problemy teplovogo kontaktirovaniya tverdykh tel / S.Yu. Mesnyankin, A.G. Vikulov, D.G. Vikulov // Uspekhi fizicheskikh nauk. – 2009, t. 179, №9. – S. 945 – 970.
4. Izmaylov, V.V. Kontakt tverdykh tel i ego provodimost': monografiya / V.V. Izmaylov, M.V. Novoselova. - Tver': TvGTU, 2010. – 112 s.
5. Ivanov, A.S. Termicheskaya provodimost' ploskogo styka / A.S. Ivanov, B.V. Izmaylov // Vestnik mashinostroeniya. - 2009, №7. - S. 41-43.
6. Yovanovich, M.M. Thermal Spreading and Contact Resistance / M.M. Yovanovich, E.E. Marotta // Heat Transfer Handbook, chapt. 4. – New York: Wiley, 2003. – p. 261 – 393.
7. Isachenko, V.P. Teploperedacha / V.P. Isachenko, V.A. Osipova, A.S. Sukomel. – M.: Energiya, 1975. – 488 s.
8. Holm, R. Electric Contacts / R. Holm. – Berlin e.a.: Springer-Verlag, 1967. - 484 p.
9. Izmaylov, V.V. Metodika rascheta perekhodnogo soprotivleniya kontaktov vakuumnykh dugogasitel'nykh kamer / V.V. Izmaylov, N.I. Kleshnin, S.A. Federyaev // Izvestiya VUZov. Elektromekhanika. – 1990, №11. – s. 5 – 9.
10. Miller, V.S. Kontaktnyy teploobmen v elementakh vysokotemperaturnykh mashin / V.S. Miller. – Kiev: Naukova dumka, 1966. – 164 s.
11. O'Callaghan, P.W. Alleviating Thermal Resistance of Thermally Distorted Pressed Contacts / P.W. O'Callaghan, S.D. Probert // Proc. Inst. Mech. Engrs. Part C. Mech. Eng. Sci. – 1987, V. 201, No. C6. – P. 421 – 426.
12. Demkin, N.B. Kachestvo poverkhnosti i kontakt detaley mashin / N.B. Demkin, E.V. Ryzhov. – M.: Mashinostroenie, 1981. – 244 s.