

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПО ТЕПЛОВОМУ КОНТАКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Меснянкин С.Ю.

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия
e-mail: heat@mai.ru*

Рассматриваются вопросы, связанные с определением температурного состояния контактирующих элементов авиационных двигателей. Проанализированы физические аспекты контактного теплообмена, и выполнено сопоставление экспериментальных и расчетных данных для воздушных сред. Предложена обобщающая зависимость для расчета температурных потерь в контактирующих телах.

Ключевые слова: тепловое контактирование, контактное термическое сопротивление, анализ расчетных зависимостей, обобщенная зависимость, сопоставление с экспериментом.

Введение

В последнее время резко возрос интерес к изучению контактного термического сопротивления (к.т.с.), возникающего при прохождении теплового потока через зону неидеального контактирования твердых тел. Подавляющее число публикаций относится к безвоздушной среде [1, 2]. Вместе с тем, очень актуальным в настоящее время является учет к.т.с. в конструктивных элементах наземных установок и авиационных двигателей. Отсутствие четких рекомендаций по контактному теплообмену в воздушных средах заставляет расчетчиков пользоваться устаревшими формулами. Все это потребовало более детального изучения механизма теплового контактирования в газовых средах, анализа и обобщения всех известных и доступных данных по к.т.с. в воздухе с целью выработки более надежных и точных соотношений.

Физические аспекты контактного теплообмена

Контактное термическое сопротивление представляет собой прежде всего поверхностный эффект, обусловленный дискретностью контакта и, вследствие этого, стягивания и удлинения линий теплового потока к контактными пятнами. Зависит данная величина от тепловых и механических свойств взаимодействующих материалов и среды в зазоре. При этом принято считать, что тепловая

энергия от одного контактирующего тела к другому может передаваться тремя различными способами:

- проводимостью через микроконтакты α_m ;
- проводимостью через межконтактную среду α_c ;
- тепловым излучением через пространство между контактирующими телами, если заполняющая его среда не является препятствием для излучения.

При этом необходимо иметь в виду, что при малой теплопроводности межконтактной среды в условиях неплотного прилегания взаимодействующих поверхностей материалов соединение является наихудшим и поверхностные явления становятся доминирующими. Если соединение осуществлено путем сварки, пайки или вакуумного напыления слоя одного материала на поверхность другого, то имеет место наилучшее соединение и контактное термическое сопротивление зависит от свойств материала и условий соединения. Все остальные варианты находятся между этими предельными случаями. Кроме того, установлено, что при температурах в контактной зоне, не превышающих 700 К [3, 4], составляющей за счет излучения можно пренебречь.

Анализ расчетных зависимостей

Многообразие расчетных формул, неполно приведенные условия получения экспериментальных данных, на основе которых эти зависимости получены, или даже отсутствие сведений об этом вызывают сомнения в правильности выбора того или иного соотношения, а различие в абсолютных значениях к.т.с. для одних и тех же условий затрудняет их использование.

К сожалению, многие из зависимостей по контактному теплообмену, полученные для специфических условий контактирования, не применимы для целого ряда случаев инженерной практики.

В настоящее время из всех имеющихся аналитических формул по расчету к.т.с. (R_k) в газовых средах ввиду отсутствия в них эмпирических коэффициентов, требующих специальной методики определения, для широкого применения можно рекомендовать формулы, приведенные в доступной литературе [3—11]. Структура всех формул идентична.

Проводимость контакта $\left(\alpha_k = \frac{1}{R_k} \right)$ складывается из двух проводимостей, представленных через соответствующие термические сопротивления микрорезисторов R_m и R_c среды:

$$\frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_m} + \frac{1}{R_c}. \quad (1)$$

Анализ зависимостей, а также формул, предложенных другими исследователями, показал, что практически во всех формулах по определению R_k учитывается действие безразмерной нагрузки в виде одного из комплексов, представленных как отношение механической нагрузки в контактной зоне p_k к пределу прочности материала σ_B , модулю упругости E или твердости материала H , различающихся показателем степени

$$\left(\frac{p_k}{3\sigma_B} \right)^{n_1}, \left(\frac{p_k}{E} \right)^{n_2}, \left(\frac{p_k}{H} \right)^{n_3}.$$

На первый взгляд, существенной разницы в них нет. Благодаря введению различных поправочных множителей данные формулы для исследованных металлических материалов дают приблизительно одинаковый результат, но физический смысл приведенных комплексов различный. При применении

безразмерного давления в виде $\frac{p_k}{3\sigma_B}$ учитывается

влияние на свойства контакта прочностных свойств материала, что существенно при пластическом контакте, в то время как при использовании комплекса

$\frac{p_k}{E}$ учитываются упругие свойства.

В реальном случае в зависимости от характера нагружения могут одновременно проявляться как упругие, так и пластические свойства, но преобладающей роли того или иного вида деформации приведенные выражения не учитывают.

Большинство имеющихся формул было получено авторами для температур в зоне контакта не выше 0,3 от температуры плавления контактирующего материала (отношение температур бралось в градусах Цельсия), а затем результаты расчетов переносились на более высокие температуры. При этом наблюдалось сильное расхождение экспериментальных и опытных данных. В основном это объясняется тем, что при повышении температуры не сохраняется пропорциональность между твердостью материала и пределом прочности. Не коррелируют между собой прочностные и упругие свойства материала. Также при контактировании в воздухе сильное влияние оказывает межконтактная среда. При этом предварительно надо рассчитать длину температурного скачка [3] или воспользоваться графическими зависимостями [4].

Для оценки численных значений контактного термического сопротивления, получаемых по различным формулам, выполним сопоставление расчетных значений R_k и ее составляющих на примере контактной пары 1X18H10T//1X18H10T, обработанной по восьмому и седьмому классам чистоты со среднеарифметическими значениями отклонения профиля $R_{a1} = 0,68$ мкм и $R_{a2} = 1,15$ мкм при $T_k = 383$ К в воздухе.

Результаты, сведенные в таблицу, показывают существенное расхождение в расчетных значениях, особенно при малых контактных нагрузках, что объясняется недостаточной изученностью изменения толщины межконтактной прослойки от величины контактного давления. Из анализа результатов видно, что при невысоком давлении ($p_k < 0,3$ МПа) влияние контактного термического сопротивления за счет теплопроводности зазора на формирование общего сопротивления контакта является доминирующим. При увеличении контактного давления это влияние значительно ослабевает. Кроме того, полученные расчеты позволяют оценить вклад различных составляющих R_m и R_c в общее значение термического сопротивления соединения.

Работа	$\alpha_c \cdot 10^{-4}$, Вт/м ² К			$R_c \cdot 10^4$, м ² К/Вт			$\alpha_m \cdot 10^{-4}$, Вт/м ² К			$R_m \cdot 10^4$, м ² К/Вт			$\alpha_k \cdot 10^{-4}$, Вт/м ² К			$R_k \cdot 10^4$, м ² К/Вт		
	При $p_k \cdot 10^{-5}$, Па			При $p_k \cdot 10^{-5}$, Па			При $p_k \cdot 10^{-5}$, Па			При $p_k \cdot 10^{-5}$, Па			При $p_k \cdot 10^{-5}$, Па			При $p_k \cdot 10^{-5}$, Па		
	1	10	50	1	10	50	1	10	50	1	10	50	1	10	50	1	10	50
[5]	-	0,172	0,123	-	5,813	8,130	0,116	0,607	2,374	8,621	1,657	0,421	-	0,779	2,497	-	1,284	0,401
[6]	0,310	0,620	0,620	4,034	2,017	2,017	0,059	0,551	2,655	18,93	1,893	0,379	0,369	1,027	3,151	3,322	0,974	0,317
[7]	0,991	0,991	0,991	1,009	1,009	1,009	0,057	0,571	2,85	17,544	1,754	0,351	1,048	1,562	3,841	0,954	0,640	0,260

Сопоставляя приведенные данные в виде графической зависимости $R_k = f(p_k)$ для указанной контактной пары, а также расчетные результаты по формулам [3—7, 10] с экспериментом для ранее упомянутых условий контактирования, можно убедиться в большом разбросе, что объясняется неопределенностью эмпирических коэффициентов, входящих в аналитические зависимости, а также недостаточным изучением механизма изменения межконтактного зазора от величины нагрузки (рис. 1).

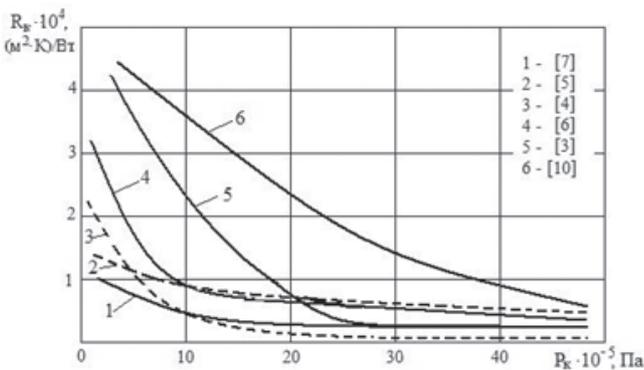


Рис. 1. Сравнительный анализ расчетных зависимостей

Обобщенное уравнение контактного теплообмена

Представим уравнение (1) в виде соотношения, структурный вид которого обоснован в работе [12].
Запишем

$$\alpha_k = \frac{\lambda_c}{\delta_3} + \frac{2 \lambda_m}{\pi a} \frac{\eta}{\psi_{сф}}, \tag{2}$$

где δ_3 — эквивалентная толщина газовой прослойки, определяемая через толщину зазора δ и длину свободного пробега l ($\delta_3 = \delta + 2l$); λ_c, λ_m — теплопроводность среды и материала соответственно;

η — относительная площадь контакта; a — радиус пятна контакта; $\psi_{сф}$ — коэффициент дискретности контакта.

Основная сложность при использовании этого уравнения состоит в определении площади фактического контакта, тем более, что получение функциональной связи между площадью фактического соприкосновения, силой сжатия, механическими свойствами материала и качеством обработки поверхности теоретическим путем возможно только ценой существенных упрощений. Также непонятно, как связать среднюю высоту двух контактирующих микровыступов $h_{ср1}$ и толщину зазора: брать $\delta = 2(h_{ср1} + h_{ср2})$ или $\delta = (h_{ср1} + h_{ср2})/2$ либо какую-то другую.

Составляющая, учитывающая проводимость через материал непосредственно контактирующих поверхностей ($\frac{2 \lambda_m}{\pi a} \frac{\eta}{\psi_{сф}}$), может быть представлена

в виде комплекса $C \frac{\lambda_m}{a} \left(\frac{p_k}{3\sigma_B E} \right)^m \left(\frac{T_k}{T_{пл}} \right)^n K^l$, где K^l

— некоторый коэффициент, учитывающий геометрию соприкасающихся поверхностей, совпадает с коэффициентом K^2 , впервые введенным Ю.П. Шлыковым [3] и в дальнейшем включенным в другие формулы.

Такой подход описан в работе [1] и является оправданным в предположении степенной зависимости относительной площади фактического контакта от относительного давления $p_k^2 / (3\sigma_B E)$, относительной температуры контакта $T_k / T_{пл}$ и от геометрических характеристик соприкасающихся тел, зависящих от высоты микровыступов.

Принимая во внимание, что $\Psi_{сф}$ есть аналитическая функция от η , уравнение (2) можно записать как

$$\alpha_k = \frac{\lambda_c}{\delta_3} + C \frac{\lambda_m}{a} \left(\frac{p_k^2}{3\sigma_B E} \right)^m \left(\frac{T_k}{T_{пл}} \right)^n K^l. \quad (3)$$

Умножая обе части уравнения (3) на δ_3/λ_c , приведем его к безразмерному виду:

$$\frac{\alpha_k \delta_3}{\lambda_c} = 1 + C \left(\frac{\lambda_m \delta_3}{a \lambda_c} \right) \left(\frac{p_k^2}{3\sigma_B E} \right)^m \left(\frac{T_k}{T_{пл}} \right)^n K^l. \quad (4)$$

Так как величина a предполагается постоянной, то последнее уравнение равносильно следующему:

$$\frac{\alpha_k \delta_3}{\lambda_c} = 1 + C_1 \left(\frac{\lambda_m \delta_3}{1 \lambda_c} \right) \left(\frac{p_k^2}{3\sigma_B E} \right)^m \left(\frac{T_k}{T_{пл}} \right)^n K^l. \quad (5)$$

Обозначая для удобства комплексы $\alpha_k \delta_3/\lambda_c$ и $\lambda_m \delta_3/(1 \cdot \lambda_c)$ соответственно через N_k и N_B , уравнение (5) запишем в виде

$$\frac{N_k - 1}{N_B} = C_1 \left(\frac{p_k^2}{3\sigma_B E} \right)^m \left(\frac{T_k}{T_{пл}} \right)^n K^l. \quad (6)$$

В записанном уравнении комплекс N_k — безразмерная проводимость контакта — играет роль критерия Нуссельта для контактного теплообмена.

Комплекс N_B является своеобразной формой критерия Био и в данном случае представляет собой отношение термических сопротивлений двух параллельных проводников теплоты.

Рассмотрим подробнее левую часть уравнения (6). Если в нее подставить выражения для безразмерных комплексов N_k и N_B , то получим

$$\begin{aligned} \frac{N_k - 1}{N_B} &= \frac{\frac{\alpha_k \delta_3}{\lambda_c} - 1}{\frac{\lambda_m \delta_3}{1 \cdot \lambda_c}} = \frac{\alpha_k \delta_3 - \lambda_c}{\frac{\lambda_c \lambda_m \delta_3}{1 \cdot \lambda_c}} = \frac{\alpha_k \delta_3 - \lambda_c}{\lambda_m \delta_3} \\ &= \frac{\alpha_k - \frac{\lambda_c}{\delta_3}}{\lambda_m} = \frac{\alpha_k - \alpha_c}{\lambda_m}. \end{aligned}$$

С другой стороны, для контакта в вакууме, когда $\alpha_c = 0$ и $\alpha_k = \alpha_m$, получаем

$$\frac{N_k - 1}{N_B} = \frac{\alpha_m}{\lambda_m} = N_m,$$

где N_m — безразмерная проводимость металлического контакта.

В окончательном варианте предлагаемая обобщающая зависимость запишется в виде

$$\frac{\alpha_k - \alpha_c}{\lambda_m} = a \left(\frac{p_k^2}{3\sigma_B E} \right)^b \cdot \frac{T_k}{T_{пл}} K^2, \quad (7)$$

где a и b — эмпирические коэффициенты, определяемые из анализа экспериментальных данных.

Теперь необходимо определить, насколько удачно полученное критериальное уравнение обобщает различные опытные данные. Для этой цели воспользуемся данными разных авторов.

Обработка производилась следующим образом. Бралось значение экспериментальной величины α_k при определенных условиях, а значение α_c вычислялось по формуле того же автора при аналогичных условиях контактирования.

Трудность обработки экспериментальных данных заключалась в том, что многие данные, а именно условия, при которых проводился эксперимент, приведены не полностью, что существенно усложняло задачу. Чистота обработки поверхности ∇ бралась средней в пределах указанного класса.

Результаты обработки экспериментальных данных в логарифмических координатах приведены на рис. 2 и обобщены зависимостью

$$\frac{\alpha_k - \alpha_c}{\lambda_m} = 3,28 \left(\frac{p_k^2}{3\sigma_B E} \right)^{0,62} \cdot \frac{T_k}{T_{пл}} K^2, \quad (8)$$

где $K^2 = 1$ при $h_{ср1} + h_{ср2} > 3 \cdot 10^{-5}$ м;

$$K^2 = \left(\frac{30}{h_{ср1} + h_{ср2}} \right)^{2/3} \quad \text{при} \quad 10^{-5} \text{ м} < h_{ср1} + h_{ср2} \leq 3 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

$$K^2 = \left(\frac{15}{h_{ср1} + h_{ср2}} \right)^2 \quad \text{при} \quad h_{ср1} + h_{ср2} \leq 10^{-5} \text{ м}.$$

Высота микронеровности $h_{ср}$ связана со стандартными характеристиками поверхности соотношениями [1, 2]: $h_{ср} = \frac{10^{-5,21+0,98 \lg Ra}}{1,25}$ для классов

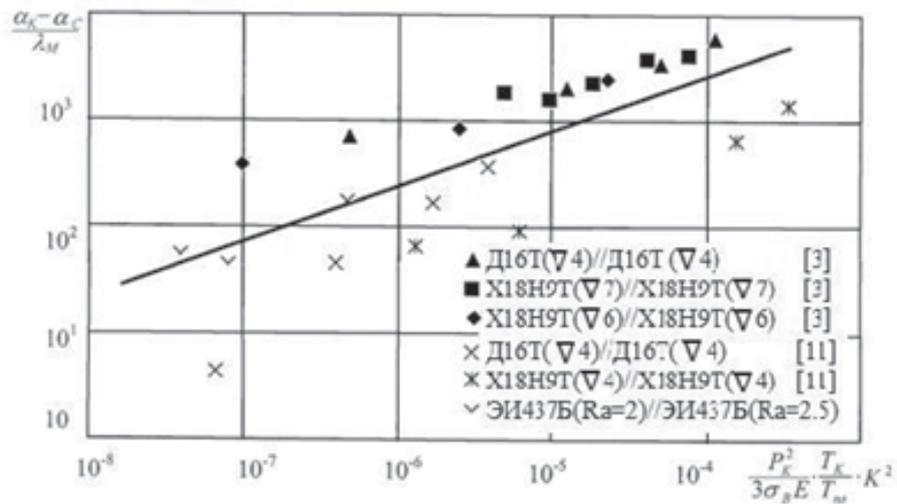


Рис. 2. Результаты обработки данных в безразмерных координатах

чистоты выше 6, а для классов чистоты меньше 6 определяется через R_z .

Как видно из представленного рисунка, корреляция экспериментальных данных и обобщающей зависимости более удачная, но далека от идеальной. Это можно объяснить тем, что брались экспериментальные данные других исследователей, возможно не очень точные результаты расчета α_c , так как отдельные данные по контактированию в условиях вакуума и в воздушной среде нигде не приводятся (это существенно усложняет задачу), поэтому пришлось α_k брать из эксперимента, а α_c находить по формулам.

Выводы

Рассмотрен механизм теплового контактирования в газовых средах, и выполнено сопоставление расчетных данных с экспериментом. Объяснены причины выявленных рассогласований, и предложена обобщающая зависимость, позволяющая более строго вычислить контактное термическое сопротивление в воздушных средах в широком диапазоне тепловой и механической нагрузки, что особенно актуально для создаваемых авиационных и ракетных двигателей.

Библиографический список

1. Меснянкин С.Ю. Системный подход в задачах определения контактного термического сопротивления // Тепловые процессы в технике. 2012. Т.4. С. 38-41.
2. Меснянкин С.Ю., Ежов А.Д., Басов А.А. Определение контактного термического сопротивления на базе трехмерного моделирования соприкасающихся поверхностей // Известия Академии наук. Энергетика. 2014. №5. С. 65-74.

3. Шлыков Ю.П., Ганин Е.А., Царевский С.Н. Контактное термическое сопротивление. — М.: Энергия, 1977. — 328 с.
4. Мальков В.А., Фаворский О.Н., Леонтьев В.Н. Контактный теплообмен в ГТД и энергоустановках. — М.: Машиностроение, 1978. — 144 с.
5. Кошкин В.К., Данилов Ю.И., Михайлова Т.В. Экспериментальное исследование контактных термических сопротивлений разнородных материалов // Известия вузов. Авиационная техника. 1971. №3. С. 75-83.
6. Хижняк П.Е. Исследование контактного термического сопротивления // Труды Государственного НИИ ГВФ. 1963. Вып. 39. 65 с.
7. Бочоришвили М.М., Санадзе В.В. Усовершенствованный метод расчета теплоконтактного сопротивления металлических поверхностей // Труды ГПИ. Тбилиси. 1975. №5. С. 23-29.
8. Швец И.Т., Дыбан Е.П. Теплообмен при контакте плоских металлических поверхностей // ИФЖ. 1967. Т. VII. №3. С. 2-3.
9. Капинос В.М., Ильченко О.Т. К вопросу определения контактного термического сопротивления смешанных пар // Труды Харьковского политехнического института. Сер. Машиностроение. 1959. Т. 19. Вып. 5. С. 217-223.
10. Попов В.М. К определению термического сопротивления контакта обработанных металлических поверхностей // ИФЖ. 1977. Т. 32. №5. С. 779-785.
11. Попов В.М., Краснобородько А.И. К определению термического контактного сопротивления в газовой среде // ИФЖ. 1975. Т. 28. №5. С. 875-883.
12. Меснянкин С.Ю. Методы расчета и регулирования контактных термических сопротивлений // Сборник научных трудов «Тепловое проектирование систем». М.: Изд-во МАИ, 1990. С.78-86.

ON THE SELECTION OF OPTIMAL VALUES FOR THE THERMAL CONTACT OF STRUCTURAL COMPONENTS OF AIRCRAFT ENGINES

Mesnyankin S.Yu.

Moscow Aviation Institute (National Research University),
MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia
e-mail: heat@mai.ru

Abstract

This paper deals with the problems related to the determination of the temperature state of contacting elements of aircraft engines, when contact thermal resistance occurs due to the imperfections of the mechanical coupling due to the discrete nature of the contact. It also considers physical aspects of the contact heat exchange and analyzes three components of thermal energy transfer.

The known analytical equations describing contacting in the air were analyzed in detail. The conclusion was drawn that the known dependences cannot be universal for practical problems, though the difference between the calculated values and the experimental data due to the uncertainty of numerous empirical coefficients and conditions of generalizing dependencies is essential. This statement is supported by the calculations with respect to the contact pair of stainless steel in a wide range of thermal and mechanical stress, which further allowed us to estimate additionally the contribution of different components of point contacts thermal resistance and environment.

Taking into consideration the revealed discrepancies and for the purpose of a more rigorous recordkeeping of temperature losses in the contact zone, the author suggests a fundamentally new generalized equation, which derivation is based on the classic analysis of the contact conductance components.

Describing successively the share of each value of the total thermal resistance in dimensionless form and justifying the influence of each of the values the author proposed the structural formula. The empirical coefficients of this formula are obtained by statistical processing of the well-known experiments. The results of summarizing are shown in the form of a graphic dependence of the contacting materials and their surface finishing.

According to the results of generalization a conclusion about a successful correlation of experimental and calculated data is made. The reasons of the marked differences are analyzed as well.

The results of the work with great certainty and precision allow us to determine the values of the thermal

contact resistance between materials of special interest and to select their optimal values.

Keywords: thermal contact, contact thermal resistance, analysis of calculated dependencies, generalized dependence, comparison with experiment.

References

1. Mesnyankin S.Yu. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2012, vol. 4, pp. 38-41.
2. Mesnyankin S.Yu., Ezhov A.D., Basov A.A. *Izvestiya Akademii nauk. Energetika*, 2014, no. 5, pp. 65-74.
3. Shlykov Yu.P., Ganin E.A., Tsarevskii S.N. *Kontaktnoe termicheskoe soprotivlenie* (Contact thermal resistance), Moscow, Energiya, 1977, 328 p.
4. Mal'kov V.A., Favorskii O.N., Leont'ev V.N. *Kontaknyye teploobmen v GTD i energoustanovkakh* (Contact heat transfer in gas turbine engines and power plants), Moscow, Mashinostroenie, 1978, 144 p.
5. Koshkin V.K., Danilov Yu.I., Mikhailova T.V. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 1971, no. 3, pp. 75-83.
6. Khizhnyak P.E. *Trudy Gosudarstvennogo NII GVF*, 1963, no. 39, 65 p.
7. Bochorishvili M.M., Sanadze V.V. *Trudy GPI*. Tbilisi, 1975, no. 5, pp. 23-29.
8. Shvets I.T., Dyban E.P. *IFZh*, 1967, vol. VII, no. 3, pp. 2-3.
9. Kapinos V.M., Il'chenko O.T. *Trudy khar'kovskogo politekhnicheskogo instituta. Seriya Mashinostroenie*, 1959, vol. 19, no. 5, pp. 217-223.
10. Popov V.M. *IFZh*, 1977, vol. 32, no. 5, pp. 779-785.
11. Popov V.M., Krasnoborod'ko A.I. *IFZh*, 1975, vol. 28, no. 5, pp. 875-883.
12. Mesnyankin S.Yu. *Sbornik nauchnykh trudov "Teplovoe proektirovanie sistem"*. Moscow, MAI, 1990, pp. 78-86.