DOI: 10.25515/PMI.2018.3.312

УДК 620.179.112

ТОПОХИМИЧЕСКАЯ КИНЕТИКА ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ АКТИВАЦИИ ФРИКЦИОННОГО КОНТАКТА

А.Ю.АЛБАГАЧИЕВ[1], **М.И.СИДОРОВ**[2], **М.Е.СТАВРОВСКИЙ**[3]
[1] *Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*
[2] *Научно-исследовательский институт «Геодезия», Красноармейск, Россия*
[3] *Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики», Мытищи, Россия*

В статье рассмотрен процесс контактного взаимодействия (относительное перемещение) поверхностей как химическая реакция, закономерность которой описывается уравнением Аррениуса. Получены кинетические характеристики Герси – Штрибека с учетом механических и температурных условий фрикционного контакта. Процесс взаимодействия материалов при трении в виде закономерностей топохимической кинетики, реализуемый за счет процессов образования и роста ядер адгезионного схватывания, позволяет представить экспериментальные характеристики в форме теоретических зависимостей. Данные зависимости отражают весь диапазон изменения коэффициента трения от скорости взаимного перемещения материалов, в том числе при сверхмалых скоростях скольжения. В рамках такого подхода смазывающее действие среды препятствует и блокирует реакции перехода зародышей в активно растущие ядра.

Ключевые слова: кинетика, трение, активация, механический, тепловой, фрикционный

***Как цитировать эту статью*:** Албагачиев А.Ю. Топохимическая кинетика внешнего трения при механической и тепловой активации фрикционного контакта / А.Ю.Албагачиев, М.И.Сидоров, М.Е.Ставровский // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 312-316. DOI: 10.25515/PMI.2018.3.312

Введение. Формулировка модели топохимической кинетики адгезионного схватывания двух трущихся поверхностей сводится к следующему [3]. В зоне пятен контакта образуются зародыши и растущие ядра схватывания (здесь термин «пятна контакта» относится к движущимся поверхностям, а «ядра схватывания» – к топохимической реакции адгезионного схватывания). На разрушение этих ядер требуется энергия, расходуемая на единицу пути; ее диссипация фиксируется как трение, что приводит к особенностям реализации процесса.

Образование ядер схватывания на пятнах контакта представляется как топохимическая реакция, которая протекает в двумерном реакторе. В модели фиксируются два процесса и две скорости – скорость перемещения и скорость топохимической реакции, или два характерных времени – время пробегания друг относительно друга двух контактирующих поверхностей и время течения топохимической реакции до некоторого значения степени превращения (степени покрытия поверхности ядрами схватывания). Соотношения между этими скоростями или временами должны определить характерные черты процесса. Тогда задача управления процессом трения сводится к заданию параметров топохимических реакций – констант скоростей – путем организации процессов адсорбции, десорбции, тепло- и массопереноса.

Методология исследования. При внешнем трении на фрикционном контакте происходит образование ядер схватывания. В последующие моменты времени они разрушаются в результате скольжения поверхностей друг относительно друга. Это разрушение создает новую в энергетическом отношении поверхность – более насыщенную активными дефектами. Данный процесс может быть описан следующей закономерностью: снижение энергии активации (зарождения зародышей) пропорционально скорости скольжения поверхностей или некоторой функции от скорости: $k_x = k_x(v)$. По аналогии, для константы скорости роста ядер схватывания, поскольку места их разрушения должны обладать повышенной поверхностной энергией, которая кинетически реализуется в большей скорости распространения зоны реакции при росте вновь образовавшегося ядра: $k_y = k_y(v)$.

Процесс диссипации механической энергии должен приводить к разогреву зоны взаимодействия поверхностей за счет необратимости двух процессов: образования и роста ядер схватывания, с одной стороны, и разрушения ядер, с другой. Данную необратимость отразим как локальное повышение температуры в зоне реакции $T = T(v)$.

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.312

Константу скорости химической реакции определим по уравнению Аррениуса. Тогда описанные выше закономерности примут вид

$$k_x = k_{0,x} \exp\left\{-\frac{h^*\left[E_A^* - \delta^* g(v)\right]}{E_T^* + \rho^* g(v)}\right\}; \quad (1)$$

$$k_y = k_{0,y} \exp\left\{-\frac{h\left[E_A - \delta g(v)\right]}{E_T + \rho g(v)}\right\}, \quad (2)$$

где E_A^* – энергия активации перехода зародыша в активно растущее ядро (для исходной поверхности); E_T^* – тепловой потенциал (аналогично RT для состояния идеального газа); $g(v)$ – функция преобразования энергии; $\delta^* g(v)$ – преобразование механической энергии в поверхностную энергию дефектов; $\rho^* g(v)$ – преобразование механической энергии в тепловую энергию. Для данного исследования принято $\delta^* + \rho^* = 1$.

Коэффициенты δ^* и ρ^* отражают условия зоны реакции (контакта поверхностей), близкие к изотермическим или адиабатическим. Условия, близкие к изотермическим (достаточный теплоотвод и хорошая теплопроводность материала), имеют значения $\rho^* \cong 0$, а условия, близкие к адиабатическим, $\rho^* \cong 1$ и $\delta^* \cong 0$.

Для зависимости (2) аналогичные величины имеют одинаковый физико-химический смысл.

На рисунке *а* представлены кинетические характеристики процесса внешнего трения с учетом большей или меньшей изотермичности или адиабатичности условий в зоне пятен контакта и течения топохимических реакций образования, роста и разрушения ядер схватывания (принято, что соотношения $\delta^* + \rho^* = 1$ и $\delta + \rho = 1$ приблизительно выполняются).

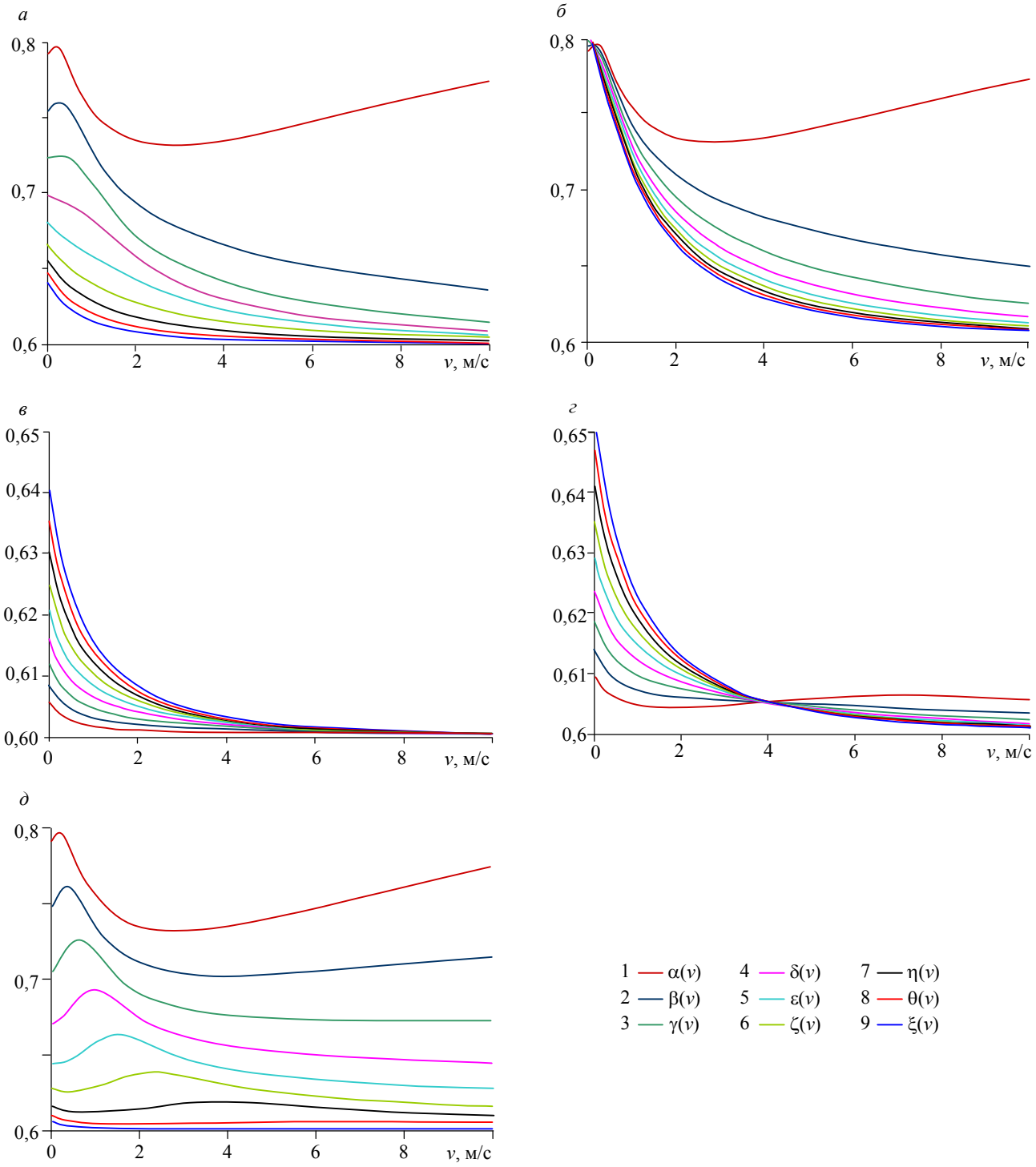
Авторами [2-5] в результате исследований, преобразования уравнений и их интегрирования получена аналитическая зависимость для вычисления степени превращения как доля покрытия поверхности пятен контакта растущими ядрами α в следующем виде:

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_0)\exp\left\{-A_0 k_y^2 t^2 \left(1 - \exp\{-k_x t\}\right)\right\}. \quad (3)$$

В данном случае предполагается следующая закономерность: чем больше активация поверхности при разрушении ядер адгезионного схватывания, тем меньше разогрев, и наоборот, чем меньше активация поверхностей, тем большая доля внешней механической энергии затрачивается на повышение внутренней энергии системы в тепловой форме. Таким образом, большое снижение энергии активации обоих процессов перехода зародышей в ядра и роста ядер и сравнительно небольшое повышение температуры с увеличением скорости приводят к росту кинетических констант и силы трения, или коэффициента трения. Эти условия, близкие к изотермическим, дают большее значение коэффициента трения (кривая 1). С другой стороны, небольшое понижение энергии активации обоих процессов и повышение температуры с увеличением скорости (условия, близкие к адиабатическим) дают меньшее значение силы трения или коэффициента трения: кривая 2 лежит ниже кривой 1 и т.д. Больший вклад диссипации внешней механической энергии в снижение энергии активации процесса перехода зародышей в ядра отражает параметр h^*. Значение этого параметра $h^* < 1$ будет отражать обратную ситуацию. Аналогичные предположения в рамках качественного исследования могут быть сделаны и для параметра h.

Кроме того, можно предположить, что бóльшая часть механической энергии воспринимается контактирующими поверхностями в форме повышения удельной поверхностной энергии. Это приводит к повышению концентрации зародышей ядер схватывания (эта задача пока не рассматривалась), а также к снижению энергии активации перехода зародышей в активно растущие ядра и энергии активации разрастания ядер адгезионного схватывания в области пятен контакта (рост k_x и k_y). В то же время можно допустить, что теплопроводность контактирующих материалов достаточно велика, а повышение температуры в зоне реакции невелико. При этом соотношения $\delta^* + \rho^* = 1$ и $\delta + \rho = 1$ не выполняются.

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.312



Кривая	График				
	а	*б* ($v > 1$, $\delta^* = \delta = 0{,}9$)	*в* ($\delta^* = \delta = 0{,}1$)	*г* ($\delta^* = \delta = 0{,}2$)	*д* ($\rho^* = \rho = 0{,}1$)
1	$\delta^* = \delta = 0{,}9$, $\rho^* = \rho = 0{,}1$	$\rho^* = \rho = 0{,}1$	$\rho^* = \rho = 0{,}1$	$\rho^* = \rho = 0{,}1$	$\delta^* = \delta = 0{,}9$
2	$\delta^* = \delta = 0{,}8$, $\rho^* = \rho = 0{,}2$	$\rho^* = \rho = 0{,}2$	$\rho^* = \rho = 0{,}2$	$\rho^* = \rho = 0{,}2$	$\delta^* = \delta = 0{,}8$
3	$\delta^* = \delta = 0{,}7$, $\rho^* = \rho = 0{,}3$	$\rho^* = \rho = 0{,}3$	$\rho^* = \rho = 0{,}3$	$\rho^* = \rho = 0{,}3$	$\delta^* = \delta = 0{,}7$
4	$\delta^* = \delta = 0{,}6$, $\rho^* = \rho = 0{,}4$	$\rho^* = \rho = 0{,}4$	$\rho^* = \rho = 0{,}4$	$\rho^* = \rho = 0{,}4$	$\delta^* = \delta = 0{,}6$
5	$\delta^* = \delta = 0{,}5$, $\rho^* = \rho = 0{,}5$	$\rho^* = \rho = 0{,}5$	$\rho^* = \rho = 0{,}5$	$\rho^* = \rho = 0{,}5$	$\delta^* = \delta = 0{,}5$
6	$\delta^* = \delta = 0{,}4$, $\rho^* = \rho = 0{,}6$	$\rho^* = \rho = 0{,}6$	$\rho^* = \rho = 0{,}6$	$\rho^* = \rho = 0{,}6$	$\delta^* = \delta = 0{,}4$
7	$\delta^* = \delta = 0{,}3$, $\rho^* = \rho = 0{,}7$	$\rho^* = \rho = 0{,}7$	$\rho^* = \rho = 0{,}7$	$\rho^* = \rho = 0{,}7$	$\delta^* = \delta = 0{,}3$
8	$\delta^* = \delta = 0{,}2$, $\rho^* = \rho = 0{,}8$	$\rho^* = \rho = 0{,}8$	$\rho^* = \rho = 0{,}8$	$\rho^* = \rho = 0{,}8$	$\delta^* = \delta = 0{,}2$
9	$\delta^* = \delta = 0{,}1$, $\rho^* = \rho = 0{,}9$	$\rho^* = \rho = 0{,}9$	$\rho^* = \rho = 0{,}9$	$\rho^* = \rho = 0{,}9$	$\delta^* = \delta = 0{,}1$

Кинетические характеристики Герси – Штрибека; расчет по уравнению (3) с учетом изотермичности и адиабатичности в зоне пятен контакта при $v_0 = 1$; $\alpha_0 = 0{,}6$; $A_0 k_y^2 = 1$; $k_x = 2$; $h_x = 5$; $h_y = 1$; различия отражены параметрами δ^*, δ, ρ^* и ρ

DOI: 10.25515/PMI.2018.3.312

На рисунке *б* активация трущихся поверхностей приблизительно одинаково высока, а параметры теплообмена зоны реакции различны. Температура с увеличением скорости скольжения повышается незначительно, а для кривых 1-9 температура с возрастанием скорости увеличивается. В таком случае для малых скоростей фиксируется возрастающая кинетическая характеристика трения при условиях, близких к изотермическим (кривая 1) и падающая – при условиях, близких к адиабатическим (кривые 3-9). Подобные экспериментальные зависимости приводятся А.С.Ахматовым [6]. Кривые рисунка *б* иллюстрируют процессы, при которых уменьшение энергии активации и повышение температуры, приводят к росту констант скоростей реакций.

Падающую кинетическую характеристику иллюстрирует рисунок *в*. В то же время при повышении скорости скольжения возрастает температура и значение коэффициента трения во всем диапазоне изменения скорости (положение кривой 9 относительно других кривых) увеличивается. Как и в предыдущих случаях, это связано с бóльшими значениями кинетических констант и соответственно с бóльшей степенью завершенности топохимической реакции в области пятен контакта.

На рисунке *г* представлены зависимости, для которых в целом кинетические характеристики являются падающими, но в некоторой области скоростей скольжения фиксируется возрастающая кинетическая характеристика (кривая 1). Кроме того, это семейство кинетических характеристик показывает, что при некотором фиксированном значении скорости происходит инверсия кривых: коэффициенты трения меняют последовательность своих значений от одной кривой к последующим кривым. Инверсия кривых, зафиксированная на рисунке *г*, отличается от инверсии, представленной на рисунке *а*.

На рисунке *д* представлены кривые, для которых характерен одинаковый вклад внешней механической диссипации в рост тепловой энергии и разный – в увеличение поверхностной энергии в форме снижения энергии активации образования и роста ядер адгезионного схватывания. Меньшая энергия активации дает большее значение степени покрытия поверхности ядрами схватывания и соответственно большее значение силы трения во всем диапазоне скоростей скольжения (кривая 1 лежит выше кривой 2 и т.д.).

Таким образом, процесс взаимодействия материалов при трении, представленный в виде закономерностей топохимической кинетики преобразования внешней механической энергии во внутреннюю энергию системы материалов и реализуемый за счет процессов образования и роста ядер адгезионного схватывания позволяет представить экспериментальные характеристики в форме теоретических зависимостей. Данные зависимости отражают весь диапазон изменения коэффициента трения от скорости взаимного перемещения материалов, включая классическую экспериментальную зависимость Герси – Штрибека, в том числе при сверхмалых скоростях скольжения.

В рамках такого подхода смазывающее действие среды проявляется в препятствии реакции перехода зародышей в активно растущие ядра (уменьшение кинетической константы k_x), а также в блокировании роста этих ядер (соответствующее уменьшение кинетической константы k_y). Механизм такого действия смазочных материалов включает стадии сорбции и массопереноса активных компонентов (в том числе плакирующих присадок), блокирующих активный центр в объеме смазочного материала. Адсорбция активных компонентов среды приводит к снижению поверхностной энергии в целом или к снижению энергии активных центров – зародышей (дефектов и пр.). Интенсивность массопереноса зависит и от гидродинамической составляющей в приповерхностном слое смазочного материала, температуры, коэффициентов диффузии активного компонента и других физико-химических свойств объектов – участников процесса трения в целом.

Заключение. Данный подход может быть развит для теоретического представления роста силы трения покоя (статическая характеристика трения), а также динамических характеристик трения, когда сила трения зависит не только от скорости, но и от ускорения (положительного или отрицательного). Кроме того, принятые положения типа линейного снижения энергии активации реакции перехода зародышей в растущие ядра адгезионного схватывания, а также их роста, при увеличении скорости скольжения могут быть уточнены использованием термодинамических закономерностей, а также постановкой задач теплопереноса. В своих основных моментах данный

подход согласуется с представлениями [1, 9-15], которые были положены в основу построения статической характеристики трения, адгезионной теории трения и теории пленочного голодания.

В развитие данных теоретических представлений авторами [5, 7] выполнен более подробный качественный анализ данной математической модели топохимической кинетики адгезионного схватывания.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Лукашев Е.А.* Трибохимическая кинетика внешнего трения / Е.А.Лукашев, М.И.Сидоров. М.: Эко-Пресс, 2016. 344 с.

2. *Лукашев Е.А.* Анализ вклада автокаталического механизма в трибохимическую кинетику адгезионного схватывания при трении скольжения / Е.А. Лукашев, И.А. Коровин // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2010. Т. 6. С.51-57.

3. *Лукашев Е.А.* Топохимическая кинетика адгезионного взаимодействия двух твердых тел в процессе трения скольжения // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2003. № 2. С.13-22.

4. *Мерзликин А.Б.* Математическое моделирование фрикционных автоколебаний при топохимической кинетике адгезионного схватывания в режиме трения скольжения: Автореф. дис... канд. техн. наук / Российский университет туризма и сервиса. М., 2010. 19 с.

5. Теоретические основы триботехнической диагностики / Е.А.Лукашев, М.Е.Ставровский, С.Г.Емельянов, А.В.Олейник / Курский государственный технический университет. Курск, 2009. 151 с.

6. *Юдин В.М.* Трибохимия водородного износа / В.М.Юдин, Е.А.Лукашев, М.Е.Ставровский / Московский государственный университет сервиса. М., 2004. 282 с.

7. *Юдин В.М.* Трибохимические исследования процессов диагностики и сервиса технологического оборудования: Автореф. дис... д-ра техн. наук / Московский государственный университет сервиса. М., 2004. 40 с.

8. *Belgaumkar B.M.* The influence of the coulomb, viscous and acceleration-dependent terms of kinetic friction on the critical velocity of stick-slip motion // Wear. 1981. Vol.70. № 1. P. 119-124. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90275-1.

9. *Godet M.* An attempt to provide an unified treatment of tribology though load carrying capacity, transport, and continuum mechanics / M.Godet, D.Play, D.Berthe // J. Lubr. Technol. 1980. Vol. 102. № 2. P. 153-157. DOI:10.1115/1.3251457.

10. *Ho J.-R.* Study of heat transfer in multi-layered structure within the framework of dual-phase-lag heat conduction model using lattice Boltzmann method / J.-R.Ho, C.-P.Kuo, W.-S Jiaung. // Int. J. Heat Mass Transfer. 2003. Vol. 46. P. 55 - 69

11. *Jacobson B.O.* An experimental determination of the solidification velocity for mineral oils // ASLE Trans. 1974. Vol. 17. № 4. P. 290.

12. *Krause H.P.* Tribomechanical Reaction in the Friction and Wearing Process of Iron // Wear. 1971. Vol. 18. № 3. P. 403-407.

13. *Krause H.P.* Tribochemische Reactionen als Verschleismechanismus bei der Waizreibung / H.Krause, C.Schroekamp // Schmierrunstechnick. 1986. Vol. 17. № 3. P. 74-79.

14. *Meyer K.* Verschleisverhalten geschmirten Reibsisteme / K.Meyer, H.Kloss // Schmierrunstechnick. 1986. Vol. 17. № 3. P. 70-74.

15. *Michalopoulos D.* Stick-slip of rotors in fluid bearings at very low speeds / D.Michalopoulos, A.Dimarogonas // Wear. 1981. Vol. 70. № 3. P. 303-309. DOI: 10.1016/0043-1648(81)90350-1.

16. Tribochemical kinetics of external friction / A.Y.Albagachiev, E.A.Lukashev, M.I.Sidorov, M.E.Stavrovskii // Russian Engineering Research. 2017. Vol. 37. № 8. P.686-693. DOI: 10.3103/S1068798X17080044.

Авторы: **А.Ю.Албагачиев**, *д-р техн. наук*, *заведующий отделом*, *Albagachiev@yandex.ru* (*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*, *Россия*), **М.И.Сидоров,** *канд. техн. наук*, *первый заместитель директора – заместитель директора по научной работе*, *info@niigeo.ru* (*Научно-исследовательский институт «Геодезия»*, *Красноармейск*, *Россия*), **М.Е.Ставровский**, *д-р техн. наук*, *заместитель директора*, *m.stavrovsky@eipc.center* (*Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики»*, *Мытищи*, *Россия*).

Статья поступила в редакцию 06.02.2018.
Статья принята к публикации 04.05.2018.