

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ,  
ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 620.192

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ РЕАКЦИИ  
В ТРИБОХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКЕ****© 2022 г. А. Ю. Албагачиев<sup>1,\*</sup>, М. Е. Ставровский<sup>2</sup>, М. И. Сидоров<sup>3</sup>,  
А. В. Рагуткин<sup>3</sup>, И. А. Александров<sup>4</sup>**<sup>1</sup>*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва, Россия*<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт “Центр экологической промышленной политики”,  
Московская область, Мытищи, Россия*<sup>3</sup>*Российский технологический университет (МИРЭА), Москва, Россия*<sup>4</sup>*Институт конструкторско-технологической информатики РАН, Москва, Россия**\*e-mail: Albagachiev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 20.04.2022 г.

После доработки 09.08.2022 г.

Принята к публикации 19.08.2022 г.

Рассмотренный материал позволяет сделать предположения о зависимости скорости реакции от температуры, которые надлежащим образом должны быть учтены в математических моделях трибохимической кинетики внешнего трения. С точки зрения трибохимической кинетики исследование зависимости скорости реакции от температуры, сводится к необходимости объяснить рост силы трения после падения и достижения минимума при увеличении скорости скольжения. В рамках исследованных моделей это поведение отражает тенденцию линейного роста температуры в зоне топохимической реакции адгезионного схватывания при росте скорости скольжения и линейной зависимости снижения энергии активации образования и роста ядер адгезионного схватывания на пятнах контакта поверхностей трения.

*Ключевые слова:* внешнее трение, адгезия, трибохимическая кинетика, скорость, температура

**DOI:** 10.31857/S0235711922060025

Одна из проблем, которую необходимо обсуждать с целью исследования процессов трибохимической кинетики взаимодействия различных материалов заключается в представлении зависимости скорости химических реакций на поверхности взаимодействующих материалов от температуры. Наиболее широко используемое представление – это уравнение Аррениуса, задающее связь константы скорости реакции от температуры в форме экспоненты. М. Поляни и Е. Вигнер [1, 2] рассмотрели процесс испарения одноатомного твердого вещества и рассчитали вероятность того, что кинетическая энергия поверхностного атома, соответствующая его движению от поверхности, достаточна для преодоления энергии химической связи. Без вывода они предложили следующее уравнение:

$$\dot{x} = 2\nu\delta \frac{E}{RT} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1)$$

где  $\dot{x}$  – линейная скорость уменьшения толщины кристалла;  $\nu$  – частота колебаний;  $\delta$  – диаметр атомов;  $E$  – преодолеваемая энергия связи.

В уравнении Аррениуса константа скорости химической реакции представляется двумя сомножителями, один из которых дает зависимость от температуры в форме экспоненты  $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ , второй ( $k_0$ ) – практически не зависит от температуры, т.е.  $k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ . Возникает вопрос о соображениях, которые привели к множителю  $\frac{E}{RT}$  в правой части уравнения (1). Этот вопрос как можно видеть, имеет принципиальное значение, поскольку увеличение температуры должно приводить к росту скорости реакции (в данном случае к росту скорости испарения), и это задается множителем  $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ . Множитель  $\frac{E}{RT}$  дает обратную тенденцию: увеличение температуры должно приводить к уменьшению скорости реакции или испарения, что не реализуется в действительности, т.к. процесс испарения является эндотермическим процессом ( $\Delta H > 0$ , изменение энтальпии величина положительная) и требует подвода теплоты.

Уравнение (1) Д. Брэдли было предложено применить для расчета скорости реакции на поверхности раздела, образующейся при разложении твердых веществ. Он обозначил путь вывода, приводящий к уравнению

$$\dot{x} = \frac{\delta n}{s\tau_0} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (2)$$

где  $\frac{n}{s}$  – плотность (концентрация) реагирующих молекул на единицу площади поверхности;  $\tau_0$  – период колебаний;  $E$  – энергия активации. При обсуждении этого уравнения Д. Янгом [3] отмечается, что по ряду причин это уравнение является неудовлетворительным. Во-первых, оно основано на предположении, что колебания являются гармоническими, что неверно, особенно для реакций диссоциации. Во-вторых, при выводе уравнения не учитывается возбуждение внутренних степеней свободы. В-третьих, в такой форме оно применимо к строго необратимым реакциям. Некоторые из этих трудностей преодолеваются в рамках теории переходного состояния.

Д. Янгом не обсуждается отличие уравнений (1) и (2), заключающееся в наличии и отсутствии в правой части множителя  $\frac{E}{RT}$ , задающего одну из тенденций при влиянии температуры на скорость реакции. Предлагается рассмотреть обратимую реакцию, скорость которой в прямом направлении задается выражением  $\frac{k_B T}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_1^\ddagger}{RT}\right)$ , а в обратном направлении – выражением  $\frac{k_B T}{h} \exp\left(-\frac{\Delta G_2^\ddagger}{RT}\right)$ , где  $\Delta G_1^\ddagger$  и  $\Delta G_2^\ddagger$  – стандартные свободные энергии образования общего переходного состояния ( $k_B$ ,  $h$  – константы Больцмана и Планка). Для эндотермической реакции разность этих двух выражений дает линейную скорость реакции

$$\dot{x} = \frac{k_B T}{h} \delta \exp\left(-\frac{\Delta G_1^\ddagger}{RT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta G}{RT}\right)\right], \quad (3)$$

где  $\Delta G$  – полное изменение свободной энергии реакции в прямом и обратном направлении. Уравнение (3) можно записать в виде

$$\dot{x} = \frac{k_B T}{h} \delta \exp\left(\frac{\Delta S_1^\ddagger}{R}\right) \exp\left(-\frac{\Delta H_1^\ddagger}{RT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{\Delta G}{RT}\right)\right]. \quad (4)$$

В случае необратимой реакции последний член можно опустить.

Различие между уравнениями (1), (2) и (4) в отношении множителей, задающих влияние температуры на скорость реакции ( $\frac{E}{RT}$  и  $\frac{k_B T}{h}$  или его отсутствие) Д. Янгом не обсуждается.

Таким образом, вопрос о зависимости константы скорости химической реакции от температуры является существенным, и его необходимо исследовать более подробно. В книге С. Бенсона [4] рассмотрены вопросы, которые возникали в ходе становления основных положений химической кинетики. Отмечается, что для константы скорости мономолекулярной реакции было предложено несколько уравнений:

- уравнение Аррениуса

$$k = A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right); \quad (5)$$

- уравнение в классической теории

$$k = \nu \exp\left(-\frac{E^*}{RT}\right); \quad (6)$$

- уравнение в квантовомеханической теории

$$k = \nu^* K^\ddagger = \nu^* \exp\left(-\frac{G^\ddagger}{RT}\right) = \nu^* \exp\left(\frac{S^\ddagger}{R}\right) \exp\left(-\frac{H^\ddagger}{RT}\right), \quad (7)$$

$$k = \nu^* \frac{Q^\ddagger}{Q} \exp\left(-\frac{E_0^\ddagger}{RT}\right); \quad (8)$$

- уравнение в теории переходного состояния

$$k = \frac{k_B T}{h} K^\ddagger = \frac{k_B T}{h} \exp\left(-\frac{G^\ddagger}{RT}\right) = \frac{k_B T}{h} \exp\left(\frac{S^\ddagger}{R}\right) \exp\left(-\frac{H^\ddagger}{RT}\right), \quad (9)$$

$$k = \frac{k_B T}{h} \frac{Q^\ddagger}{Q} \exp\left(-\frac{E_0^\ddagger}{RT}\right). \quad (10)$$

При обсуждении этих уравнений отмечается, что в классической теории фактор частоты  $\nu$  вычисляется из спектроскопических данных и имеет порядок  $10^{12}$ – $10^{14}$  с<sup>-1</sup>. Частотный фактор не зависит от температуры, так что величину  $E^*$ , которая представляет собой разность энергий активированной частицы и нормальной молекулы (обе в своих самых низших энергетических состояниях), можно идентифицировать с экспериментальной энергией активации. Разработка этой теории явилась серьезным шагом по сравнению с теорией столкновений, т.к. рассматривает химическую реакцию с позиции молекулярной структуры. В то же время она страдает от использования классической модели структуры молекулы. Одним из следствий является то, что все внутренние колебания нормальных и активных частиц должны быть полностью возбужденными, частоты идентичными, а разность энтропии для разных состояний не должна влиять на суммарную константу скорости, и поэтому она не входит явно в уравнение для скорости.

Использование квантовомеханической модели расширило детализированную теорию (уравнения (7) и (8)) так, что становится возможным рассматривать влияние структурных изменений на внутренние частоты [5, 6]. В уравнении (7)  $\nu^*$  представляет собой средневзвешенную величину внутренних частот частицы, которая имеет конфигурацию переходного комплекса, а  $K^\ddagger$  представляет собой константу равновесия

между этим переходным состоянием и нормальными молекулами. Величины  $G^\ddagger$ ,  $H^\ddagger$  и  $S^\ddagger$  являются соответственно стандартным изменением свободной энергии, энтальпии и энтропии при образовании переходного комплекса. В уравнении (8) выражение для скорости имеет форму, удобную для статистического расчета, где величины  $Q^\ddagger$  и  $Q$  представляют собой суммы по состояниям, соответственно, переходного комплекса и нормальных частиц, измеренных от самых низших энергетических состояний. Величина  $E_0^\ddagger$  — есть разность энергий для низших состояний двух частиц (энергия активации при абсолютном нуле).

В квантовомеханической модели вводится энтропия активации, что позволяет учитывать структурные изменения, но она связана с переходным комплексом, свойства которого не могут быть установлены независимо от кинетических данных. Например,  $\nu^*$  является средней частотой для переходного состояния, и, хотя возможно, что эта величина имеет то же значение, что и  $\nu$  для нормальной частоты молекулы, тем не менее, эта эквивалентность может только постулироваться. Достоинством этой модели является то, что она дает представление о свойствах переходного комплекса и намечает путь, по которому такое представление может привести к установлению связи между молекулярной структурой и реакционной способностью. На практике  $H^\ddagger$  можно отождествить с экспериментальной энергией активации, но разделить экспериментально частотный фактор между  $\nu^*$  и  $S^\ddagger$  невозможно. Выход из этого сводится к экспериментальному исследованию частотных факторов, которые заметно отличаются по порядку величин от обычных значений ( $10^{13} \text{ с}^{-1}$ ), и попытаться объяснить отклонения с помощью гипотетической структуры активированного комплекса. Таким путем можно получить дополнительные данные, например, о влиянии третьих тел, в частности растворителей, на ход реакции. Теория переходного состояния в форме, которая зафиксирована уравнениями (9) и (10), отличается от предыдущих теорий тем, что в ней делается попытка исключить неопределенность, присущую частотному фактору  $\nu^*$ , заменой его на универсальный фактор  $\frac{k_B T}{h}$ .

Уравнение (10) следует из уравнения (8), если представить сумму по состояниям  $Q^\ddagger$  для переходного комплекса как произведение сумм по состояниям (включая внутренние колебания) и если одна из внутренних частот  $\nu_e$  соответствует движению на вершине барьера. Если эту частоту  $\nu_e \ll \frac{k_B T}{h}$ , так что соответствующая колебательная сумма по состояниям  $q_e$ , можно аппроксимировать как  $q_e \approx \frac{k_B T}{h \nu_e}$ , то получается уравнение (10), где  $Q^\ddagger$  представляет собою сумму по состояниям для переходного комплекса, из которой исключена одна колебательная степень свободы. Величины  $K^\ddagger$ ,  $G^\ddagger$ ,  $S^\ddagger$  и  $H^\ddagger$  представляют собой термодинамические функции этой частицы, а  $E_0^\ddagger$  идентична  $E_0^*$ . Отмечается, что хотя такое исключение  $\nu^*$  желательно, но вызывает сомнение обоснованность такого метода исключения и, тем самым, определенность в значениях, приписываемых  $S^\ddagger$ , исходя из экспериментальных частотных факторов. Таким образом, предэкспоненциальный множитель в уравнении Аррениуса и им подобных может в соответствии с рассмотренными теориями либо зависеть от температуры, либо не зависеть.

С. Бенсон проводит сравнение теории соударения и теории переходного состояния. Выражение для константы скорости реакции можно представить в виде

$$k = \nu K^* = \nu \exp\left(-\frac{G^*}{RT}\right) = \nu K^{**} \exp\left(-\frac{E_0^*}{RT}\right), \quad (11)$$

где  $\nu$  – частота;  $K^*$  имеет ту же размерность, что и константа равновесия, которой соответствует некоторая эмпирическая свободная энергия активации  $G^*$ . Величина  $K^{**}$  определяется уравнением (11), а  $E_0^*$  интерпретируется как энергия активации при температуре абсолютного нуля. Константу  $K^{**}$  можно представить в виде соотношения функций распределения.

Различные теории приводят к выражениям, которые подобны уравнению (11). Экспериментальные данные позволяют рассчитать константы скоростей при различных температурах и в соответствии с уравнением Аррениуса определить энергию активации из уравнения

$$E_{\text{exp}} = RT^2 \frac{\partial(\ln k_{\text{exp}})}{\partial T} = -R \frac{\partial(\ln k_{\text{exp}})}{\partial(1/T)}. \quad (12)$$

С изменением температуры значение  $E_{\text{exp}}$  меняется мало, и для ограниченного диапазона температур, доступного для эксперимента, погрешность будет невелика, если

$$E_{\text{exp}} = E + CT, \quad (13)$$

где  $C$  и  $E$  – константы. Это позволяет проинтегрировать уравнение (12) и получить аналог уравнения Аррениуса в виде

$$\ln k_{\text{exp}} = -\frac{E}{RT} + \frac{C}{R} \ln T + \ln k_0, \quad (14)$$

или

$$k_{\text{exp}} = k_0 T^{C/R} \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (15)$$

где  $k_0$  – постоянная интегрирования. В уравнении (15) два члена определяют зависимость константы скорости реакции от температуры. Один дает экспоненциальную зависимость  $\exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ , где  $E = \text{const}$ , второй представлен предэкспоненциальным множителем  $k_0 T^{C/R}$ . Предэкспоненциальный множитель в соответствии с теорией соударений молекул с твердой сферой определяется величиной  $\bar{Z}_{AB} P$ , где  $\bar{Z}_{AB}$  – частота соударений молекул  $A$  и  $B$ . Теория соударений для  $\bar{Z}_{AB}$  дает

$$\bar{Z}_{AB} = \text{const} \left(\frac{T}{\mu}\right)^{1/2}, \quad (16)$$

где  $\mu$  – приведенная масса ( $\frac{1}{\mu} = \frac{1}{m_A} + \frac{1}{m_B}$ ,  $m_A$ ,  $m_B$  – массы молекул  $A$  и  $B$ ).

При рассмотрении теории соударений в случае бимолекулярных реакций отмечается, что константа скорости бимолекулярной реакции равна

$$k_{AB} = \bar{Z}_{AB} P(A, B), \quad (17)$$

где  $\bar{Z}_{AB}$  – удельная частота соударений;  $P(A, B)$  – вероятность того, что соударение приводит к реакции. В простейшем случае, когда энергия соударения распределяется

по одной химической степени свободы, для константы скорости реакции получено выражение

$$k_{AB} = \bar{Z}_{AB} P \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (18)$$

где  $P$  – стерический фактор. Из сопоставления (17) и (18) следует, что  $P(A, B) = P \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ . Тем самым, сравнение (15) и (16) в теории соударений приводит к следующему:

$$(T)^{C/R} = (T)^{1/2} \quad \text{или} \quad \frac{C}{R} = \frac{1}{2}. \quad (19)$$

Интерпретация  $P$  сводится к тому, что вероятность результата бимолекулярной реакции меньше единицы, т.е.  $P \leq 1$ . Это объясняется тем, что не всякое бимолекулярное взаимодействие приводит к образованию продуктов реакции, даже в том случае, если энергия сталкивающихся частиц достаточно велика для того, чтобы частицы прореагировали между собой. Для того чтобы достаточно сложные молекулы прореагировали между собой, они должны быть соответствующим образом ориентированы одна относительно другой, поэтому величину  $P$  называют стерическим фактором. В теории активированного комплекса (переходного состояния) соответствующий член называют энтропийным фактором, и, т.к. энтропия активации меньше нуля, то  $P$  не может быть больше единицы.

При рассмотрении реакций обмена, идущих с образованием активированного комплекса, для случая квантовомеханической модели получено уравнение для константы скорости реакции вида

$$k = \frac{A_* \exp\left(-\frac{E_0}{RT}\right)}{T^{1/2} \left(1 - \exp\left(-\frac{B_*}{RT}\right)\right)^2}, \quad (20)$$

где  $A_*$  и  $B_*$  – константы, вычисляемые теоретически. Использование уравнения (12) приводит к выражению для энергии активации

$$E_{\text{exp}} = RT^2 \frac{\partial (\ln k_{\text{exp}})}{\partial T} = E_0 - \frac{1}{2} RT + \frac{C_* R}{\exp\left(-\frac{B_*}{RT}\right) - 1}, \quad (21)$$

где  $C_*$  – константа. Из (21) следует для константы скорости реакции  $k$

$$k = \frac{A_* \exp\left(\theta - \frac{1}{2}\right)}{T^{1/2}} \exp\left(-\frac{E_{\text{exp}}}{RT}\right), \quad (22)$$

где  $\theta = \frac{C_*}{T \left(\exp\left(\frac{B_*}{RT}\right) - 1\right)}$ , а член  $\exp\left(\frac{B_*}{RT}\right) - 1$  дает характеристику частотного фактора.

Согласно уравнению (21),  $E_{\text{exp}} = E_0 + \left(\theta - \frac{1}{2}\right) RT$ , т.е. экспериментально наблюдаемая

энергия активации  $E_{\text{exp}}$  должна увеличиваться с ростом температуры, поскольку расчет  $\theta$  (за счет  $\exp\left(\frac{B_*}{RT}\right) \rightarrow 1$  при  $T \rightarrow \infty$ ).

Таким образом, интерес представляет не только зависимость от температуры предэкспоненциального множителя, но и зависимость энергии активации от температуры. Для характеристики энергии активации в [7] рассматриваются энергетические состояния реагентов, продуктов и активированного комплекса. Вводится  $E_0$  – потенциальная энергия исходного состояния

$$E_0 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_k} h\nu_i, \quad (23)$$

$\nu_i$  – частоты колебаний атомов;  $n_k$  – полное число колебательных степеней свободы;  $E_0$  – нулевая энергия частиц реагентов (нулевая – в смысле нулевого, т.е. самого низкого энергетического уровня). Кроме того, определяется  $E_a$  как истинная энергия активации реакции:  $E_a = E_0^\ddagger - E_0$ , аналогично  $E_0$  вводится  $E_0^\ddagger$  – нулевая энергия активированного комплекса  $E_0^\ddagger = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_k^\ddagger} h\nu_i^\ddagger$ .

Для скорости реакции по теории переходного состояния приводится уравнение

$$v = \frac{k_B T}{h} \frac{z^\ddagger}{z_1 z_2 \dots} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) c_1 c_2 \dots \quad (24)$$

Константу скорости реакции выражают в единицах молярности

$$k = \frac{k_B T}{h} \frac{z^\ddagger}{z_1 z_2 \dots} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) N_A^{n-1} M^{1-n} [\text{с}^{-1}]. \quad (25)$$

Здесь  $n$  – число взаимодействующих частиц;  $M$  – молярная масса;  $N_A$  – число Авогадро (здесь  $N_A/M$  – концентрация, выраженная как число частиц в единице массы вещества).

Основное значение [7] теории переходного состояния заключается в возможности вычисления предэкспоненциального множителя. Для этого необходимо вычислить статистические суммы для реагентов, отсчитанные от нулевых энергий:  $z_1, z_2, \dots, z^\ddagger$  ( $z^\ddagger$  – статистические суммы для активированного комплекса, отсчитанного от нулевой энергии). Полные статистические суммы есть произведение поступательных, вращательных и колебательных статистических сумм.

Поступательная

$$(z_i)_\Pi = \left(\frac{2\pi m_i k_B T}{h^2}\right)^{3/2}, \quad (26)$$

где необходимо знать только массу частицы.

Вращательные для линейных частиц

$$z_B = \frac{8\pi^2 k_B T}{\gamma h^2} I, \quad (27)$$

где  $I$  – момент инерции относительно центра масс.

Вращательные для нелинейных частиц

$$z_B = \frac{8\pi^2 (k_B T)^{3/2}}{\gamma h^3} (8\pi^3 I_x I_y I_z)^{1/2}, \quad (28)$$

где  $I_x, I_y, I_z$  – моменты инерции частицы относительно главных осей инерции;  $\gamma$  – число симметрии, показывающее, сколькими независимыми способами частица может быть совмещена сама с собой. Отмечается, что методов экспериментального изучения геометрии активированного комплекса в настоящее время нет, в отличие от реагентов и продуктов; поэтому расчеты основываются на ряде априорно принимаемых предположений.

Колебательные статистические суммы для каждой степени свободы в приближении гармонического осциллятора (из спектров ИК и КР)

$$z_K = \frac{1}{1 - \exp(-h\nu/k_B T)}. \quad (29)$$

Таким образом, основное уравнение теории переходного состояния для константы скорости реакции дает зависимость от  $T$ , которая отличается от уравнения Аррениуса. Выражение для  $k$  содержит множитель  $T$  и зависящие от  $T$  статистические суммы. Если не учитывать вклад в эту зависимость колебательных сумм, считая, что вообще их вклад невелик, то можно записать общее уравнение в виде  $k = AT^n \exp(-E_a/RT)$ , где  $A$  – строго не зависящий от  $T$  множитель; при невысоких  $T$  колебательные статистические суммы мало отличаются от единицы; лишь при очень высоких  $T$ , например, в процессах горения, колебательные суммы становятся много больше единицы;  $n$  – зависит от конкретного типа реакции; поступательные и вращательные статистические суммы имеют степенную зависимость от  $T$ .

Рассмотренный материал позволяет предложить две гипотезы, которые можно изучить в вычислительном эксперименте с дополнениями, и внести в математические модели трибохимической кинетики внешнего (адгезионного) трения [8–11]. Вопрос, который побудил прояснение точки зрения химической кинетики на зависимость скорости реакции от температуры, сводится к необходимости объяснить рост силы трения (или коэффициента трения при постоянной нагрузке на контактирующие поверхности) после ее падения и достижения минимума при увеличении скорости скольжения. В рамках исследованных моделей трибохимической кинетики [8, 12–14] это поведение было обусловлено тем, что используется простейшее приближение, отражающее следующую тенденцию: рост скорости скольжения приводит к линейному росту температуры в зоне топохимической реакции адгезионного схватывания и к линейной зависимости снижения энергии активации образования и роста ядер адгезионного схватывания на пятнах контакта взаимодействующих поверхностей. Линейный характер зависимости приводит к тому, что при определенных значениях скорости скольжения энергия активации становится отрицательной, что дает рост экспоненциальных членов зависимости. Рост силы трения при высоких скоростях фиксируется экспериментально и должен найти теоретическое объяснение. Математические модели трибохимической кинетики основываются на принятых предположениях и допущениях, которые можно развить, уточнить и проверить на предмет согласия с данными эксперимента. В то же время вычислительный эксперимент позволит наметить пути решения задачи, в частности, формально вычисляемую отрицательную энергию активации можно интерпретировать как рост концентрации активных частиц (“накачка”) за счет развивающегося процесса образования и разрушения ядер адгезионного схватывания (мостиков сваривания) при росте числа элементарных актов контактирования и увеличении скорости скольжения поверхностей.



## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Отдельные результаты настоящей работы получены в рамках работ по Соглашению о предоставлении субсидии от 24 июня 2021 года № 075-11-2021-034 (идентификатор государственного контракта – 000000S407521QKZ0002) по теме: “Создание высокотехнологичного серийного производства многоступенчатых центробежных насосов для агрессивных сред с повышенной износо- и коррозионной стойкостью” с Министерством науки и высшего образования РФ.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Polanyi M., Wigner E.* Reprinted in the Collected Works of Eugene Paul Wigner. The Scientific Papers. Part I. Physical Chemistry: Berlin and Heidelberg: Springer–Verlag, 1997.
2. *Макарова Л.Л.* Химическая кинетика и катализ. Ижевск: Изд. центр “Удмуртский университет”, 2019. 144 с.
3. *Янг Д.* Кинетика разложения твердых веществ. Перевод с англ. М.: Мир, 1969. 263 с.
4. *Бенсон С.* Основы химической кинетики / Под ред. чл.-корр. АН СССР Н.М. Эмануэля. Перевод с англ. М.: Изд-во Мир, 1964. 602 с.
5. *Розовский А.Я.* Гетерогенные химические реакции (кинетика и макрокинетика). М.: Наука, 1980. 324 с.
6. *Горичев И.Г.* Кинетика и механизмы растворения оксидов 3d-металлов в кислых средах. Автореферат диссертации доктора химических наук. Москва, 2000. 54 с.
7. *Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г.* Курс химической кинетики. М.: Высшая школа, 1984. 464 с.
8. *Коптев Н.П., Юркин Ю.А., Лукашев Е.А.* Качественный анализ математической модели топохимической кинетики адгезионного взаимодействия двух твердых тел в процессе трения скольжения // Теоретические и прикладные проблемы сервиса. 2007. № 2 (23). С. 20.
9. *Албагачиев А.Ю., Сидоров М.И., Ставровский М.Е.* Топохимическая кинетика внешнего трения при механической и тепловой активации фрикционного контакта // Записки Горного института. 2018. Т. 231. С. 312.
10. *Хайнике Г.* Трибохимия. М.: Мир, 1987. 584 с.
11. *Яковлев Н.Н., Лукашев Е.А., Радкевич Е.В.* Проблемы реконструкции процесса направленной кристаллизации // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 5. С. 625.
12. *Олейник А.В., Лукашев Е.А., Посеренин С.П.* Статистические распределения отказов, генерируемые кинетикой накопления повреждений в материале деталей // Технология машиностроения. 2009. № 10. С. 29.
13. *Vagin A.V., Sidorov M.I., Albagachiev A.Y., Stavrovskii M.E.* Improving the life of artillery systems // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. № 3. P. 211.
14. *Лукашев Е.А., Коптев Н.П., Юркин Ю.А.* Кинетические модели статистики накопления повреждений в конструкционных материалах: монография. М.: РГУТиС, 2007. 295 с.