

**ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ****TECHNICAL SCIENCES**

УДК 625.76.08

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-628-635>

Поступило в редакцию 27.08.2021

Received 27.08.2021

**М. Л. Хейфец<sup>1</sup>, В. С. Крутько<sup>2</sup>, Н. Л. Грецкий<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*«НПО Центр» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБОРУДОВАНИЯ,  
ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ПОЛЯ И ПОТОКИ ЭНЕРГИИ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ***(Представлено академиком А. П. Ласковневым)*

**Аннотация.** Рассмотрено использование критериев переноса для анализа процессов формирования структур и фаз, многократно сокращающее объем экспериментальных исследований при проектировании технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии. Предлагается при управлении источниками энергии использовать соотношения, пропорциональные критериям тепло- и массопереноса, электро- и физико-химического взаимодействия. Показано, что моделирование совместных электромагнитных и термомеханических воздействий при проектировании технологических процессов и оборудования базируется на критериях тепло- и массопереноса, электро- и физико-химического взаимодействия, определяет основные технологические факторы и связывает геометрические и физико-механические параметры качества с производительностью обработки.

**Ключевые слова:** проектирование комплексов, технологические процессы и оборудование, поля и потоки энергии, структурообразование в материале и на поверхности изделия

**Для цитирования.** Хейфец, М. Л. Проектирование технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии на основе анализа критериев подобия / М. Л. Хейфец, В. С. Крутько, Н. Л. Грецкий // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2021. – Т. 65, № 5. – С. 628–635. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-628-635>

**Mikhail L. Kheifetz<sup>1</sup>, Vyacheslav S. Krutko<sup>2</sup>, Nikolay L. Gretskiy<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Open Joint Stock Company «NPO Center» of the National Academy of Sciences of Belarus,  
Minsk, Republic of Belarus***DESIGNING THE TECHNOLOGICAL PROCESS AND EQUIPMENT USING FIELDS  
AND ENERGY FLOWS BASED ON ANALYSIS OF SIMILARITY CRITERIA***(Communicated by Academician Alexander P. Laskovnev)*

**Abstract.** It is shown that the use of transfer criteria for analysis of the formation processes of structures and phases significantly reduces the amount of experimental research in the design of technological process and equipment using fields and energy flows. It is proposed to use the ratios proportional to the criteria of heat and mass transfer, physicochemical interaction when controlling energy sources. It is shown that the modeling of the combined electromagnetic and thermomechanical effects in the design of technological process and equipment is based on the criteria of heat and mass transfer, electrical and physicochemical interaction, determines the main technological factors, and relates geometric and physical parameters, as well as mechanical quality parameters with the processing performance.

**Keywords:** design of complexes, technological process and equipment, fields and energy flows, structure formation in the material and on the surface of the product

**For citation.** Kheifetz M. L., Krutko V. S., Gretskiy N. L. Design the technological process and equipment using fields and energy flows based on analysis of similarity criteria. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 5, pp. 628–635 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-5-628-635>

© Хейфец М. Л., Крутько В. С., Грецкий Н. Л., 2021

**Введение.** Широко применяемые в мировом производстве традиционные и новые высокоэффективные технологии, в том числе и для аддитивного производства позволяют заключить, что наиболее перспективно применение технологических процессов и оборудования по наращиванию слоев и формообразованию поверхностей изделий, использующих различные сочетания материалов и источников энергии [1; 2]. Опыт применения мехатронных технологических комплексов на базе многофакторной оптимизации производительности и качества обработки [3; 4], управления технологическими процессами на основе использования критериев переноса [5; 6] потребовал разработки системного подхода для повышения эффективности и сокращения сроков проектирования процессов и оборудования [7].

Цель по созданию системологии проектирования высокоэффективных технологий и оборудования, в свою очередь, ставит задачи по изучению распределения компонентов материала, полей и потоков энергии не только по заданному контуру или поверхности, но и по глубине от поверхности изделия, по характеру подачи импульсов энергии и материала, а также по анализу формирования связей в технологической системе при интенсивных электромагнитных и термомеханических воздействиях [8–11].

**Последовательности поверхностных термомеханических и электрофизических явлений при интенсификации процессов обработки.** Особенности проектирования процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии, заключаются в том, что согласно критериям тепло- и массопереноса определяются последовательности этапов структурообразования в обрабатываемом материале и на формируемой поверхности при увеличении мощности технологических воздействий. При этом последовательности, описывающие достаточно плавное увеличение мощности (обозначенные на схеме  $\Rightarrow$ ), в случаях ее резкого возрастания (обозначенные на схеме  $\rightarrow$ ) сокращают количество этапов перехода, и чем интенсивнее происходит ее рост, тем меньше наблюдается промежуточных этапов, описывающих поверхностные явления структурообразования [1–3; 7; 8]:

$$\begin{array}{c}
 \boxed{
 \begin{array}{c}
 (Re In) \quad \overline{(Re In)} \\
 Pe(1/Pr) \Rightarrow Re(Pr Ds) \Rightarrow Mr(Re/Pr)(In/Ds) \Rightarrow Gr(Pr) \Rightarrow Rl \\
 (Ds) \quad \uparrow (Re In/Ds)
 \end{array}
 }
 \end{array}
 , \tag{1}$$

в которой  $Pe = \nu t / \omega$  – критерий Пекле;  $Pr = V / \omega$  – критерий Прандтля;  $Re = Vt / \nu$  – критерий Рейнольдса;  $In = \beta g \nabla T (t^2 / V^2)$  – отношение подъемной силы плавучести к инерционной силе;  $Ds = \sigma_k \nabla T t (V\rho / \nu)$  – отношение сил капиллярности и вязкости;  $Mr = \sigma_k \nabla T (t^2 / (\rho \omega \nu))$  – критерий Марангони;  $Gr = \beta g \nabla T (t^4 / \nu^2)$  – критерий Грасгофа;  $Rl = \beta g \nabla T (t^4 / (\omega \nu))$  – критерий Рэлея; где  $t$  – характерный размер;  $\omega$  – коэффициент температуропроводности;  $V$  – скорость;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $g$  – ускорение свободного падения;  $T$  – абсолютная температура;  $\sigma_k$  – коэффициент термокапиллярности;  $\rho$  – плотность технологической среды.

Описывающая незатопленные струи с большой кинетической энергией при увеличении скорости их истечения в средах с высоким сопротивлением последовательность критериев массопереноса [11–13]:

$$Re (ReM) \Rightarrow We, \tag{2}$$

где  $M = \nu^2 \rho / t \sigma$  – критерий распада струи;  $We = \rho V^2 t / \sigma$  – критерий Вебера, где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения на границах раздела сред.

Характеризующие поля и потоки критерии энергии при электрофизической обработке оказывают существенное влияние на последовательность поверхностных явлений структурообразования и дают возможность определить факторы, управляющие формированием свойств обрабатываемого материала и формируемой поверхности [2; 4; 7; 8]:

$$Sm \left( \frac{Em}{Se} \right) \Rightarrow Si \text{ и } Mr(Ek) \Rightarrow E \left( \frac{Tk}{Ek} \right) \Rightarrow Rl, \quad (3)$$

где  $Sm = \frac{IB}{(V^2 \rho t)}$  – критерий магнитного воздействия;  $Em = \frac{VE_1}{(H'B)}$  – отношение скорости потока к его теплосодержанию и напряженности электрического поля к его магнитной индукции;  $Se = \frac{E_1 t^2}{(IR)}$  – критерий напряженности электрического поля;  $Si = \frac{I^2 R}{(V \rho H t^3)}$  – энергетический критерий;  $Ek = \frac{\varepsilon \gamma^2 \nabla T}{\sigma_k}$  – отношение термоэлектрической и капиллярной сил;  $E = \frac{\varepsilon \gamma^2 \nabla T^2 t^2}{(\rho \omega v)}$  – термоэлектрический критерий;  $Tk = \frac{\rho \beta q t^2}{\sigma_k}$  – отношение подъемной силы плавучести к капиллярной силе, где  $I$  – сила тока;  $B$  – магнитная индукция;  $H'$  – энтальпия потока;  $R$  – электросопротивление;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $\gamma$  – коэффициент термоэлектродвижущей силы;  $E_1$  – напряженность электрического поля.

**Выбор критериев переноса для проектирования термомеханических и электрофизических процессов обработки.** При изучении термомеханических процессов при электрофизической обработке целесообразно использовать критерии Пекле (Pe) и Рейнольдса (Re) [1–4; 7; 8].

Критерий Пекле характеризует отношение количества теплоты, отводимого конвекцией и путем теплопроводности, и определяет, является ли данный источник теплоты быстродвижущимся [14; 15]. Критерий Рейнольдса описывает переход ламинарного движения обрабатываемого материала в турбулентное течение, Re представляется произведением Pe · Pr, в котором критерий Прандтля (Pr) характеризует способность теплоты распространяться в данной среде [1; 8; 14; 15].

Для описания тепломассопереноса при использовании концентрированных потоков энергии применяются критерии, характеризующие поверхностные и пространственные движения потоков вещества [1–3; 7; 8].

Поверхностные течения вследствие проявления термокапиллярных явлений, порожденных зависимостью поверхностного натяжения от температуры, описываются критерием Марангони (Mr) [1–3; 8; 14; 15]. Критерий Грасгофа (Gr) характеризует ротацию потока, учитывающую влияние естественной конвекции, при свободном движении потоков жидкости внутри формируемого слоя [1; 8; 14; 15]. Образование в объеме расплавленного слоя силой плавучести пространственно-периодической системы тороидальных вихрей представляется критерием Рэля (Rl) [1; 8; 14; 15].

Переходы при истечении струи жидкости от осесимметричного к волнообразному распаду, а затем к турбулентному распылу в процессах массопереноса описываются критериями распада (M) и Вебера (We) [11–13].

При оптимизации электрофизических процессов по параметрам формирующихся структур для управления источниками энергии используются критерии, характеризующие электромагнитные потоки [2; 4; 7; 8].

Выводимый из уравнения энергии критерий  $Si$  показывает соотношение между джоулевой теплотой и кинетической энергией потока:

$$Si = \frac{V}{H'} \frac{R/t}{\rho V^2} \left( \frac{I}{t} \right)^2.$$

Критерий магнитного взаимодействия  $Sm$  необходим при обобщении электрических характеристик источников энергии с магнитным управлением электрической дугой.

Критерий  $Sm$  получается из уравнения импульсов  $P\tau = \rho V$  и раскрывает соотношение между электромагнитной и инерционной силами:

$$Sm = \frac{B}{\rho V^2} \frac{I}{t} = \frac{B}{\tau(PV)} \frac{I}{t}.$$

Критерий напряженности электрического поля  $Se$  вытекает из закона Ома и описывает проводимость рабочей зоны:

$$Se = \frac{E_1 t}{R/tI}.$$

Соотношение критериев магнитного взаимодействия  $Sm$  и напряженности электрического поля  $Se$  дает выражение

$$\frac{Sm}{Se} = \frac{B}{E_1} \frac{R/t}{\rho V^2} \left( \frac{I}{t} \right)^2,$$

которое аналогично энергетическому критерию  $Si$  и связывает отношения удельного электросопротивления рабочего зазора  $R/t$  к кинетической энергии потока  $\rho V^2$  и силы тока  $I$  к длине разрядного промежутка  $t$ . Отличие этих формул в том, что первая определяет отношение скорости потока  $V$  к его теплосодержанию  $H'$ , а вторая – отношение магнитной индукции  $B$  к напряженности электрического поля  $E_1$ .

Напряженность поля  $E_1$  для источников тока (генераторов электрических импульсов) характеризуется напряжением  $U$  холостого хода, а для источников напряжения (трансформаторов) – силой разрядного тока  $I$ .

Соотношение критериев магнитного взаимодействия  $Sm$  и напряженности электрического поля  $Se$  дает выражение, аналогичное энергетическому критерию  $Si$  и связывает отношения удельного электросопротивления рабочего зазора  $R/t$  к кинетической энергии потока  $\rho V^2$  и силы тока  $I$  к длине разрядного промежутка  $t$ .

Использование последовательностей критериев переноса (1)–(3) для анализа процессов образования структур и фаз материала и поверхности многократно сокращает объем экспериментальных исследований при проектировании технологических процессов и оборудования, использующих поля и потоки энергии.

**Анализ обратных связей в технологической системе, использующей поля и потоки энергии.**

Процессы формирования поверхностного слоя в технологической системе термомеханической и электрофизической обработки описываются модифицированными критериями Рейнольдса  $Re^*$ , Прандтля  $Pr^*$  и критерием Пекле  $Pe$  [1; 2; 8]:

$$Re^* = \frac{Pe}{Pr^*} = \frac{V_S t}{\omega^* Pr^*} = \frac{V_S t}{\nu^*} = \frac{V_S t}{(\sigma_P / \sigma_M)(V/S)} = \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \right) \left( \frac{V_S t}{V} \right),$$

в которых  $\vec{V}_S = \vec{V} + \vec{S}$  – результирующая скорость движений формирования поверхности, главного  $V$  и подачи  $S$ ;  $t$  – толщина наносимого и деформируемого слоя с учетом изменения его плотности  $\rho$ ;  $\omega^*$  и  $\nu^*$  – соответственно обобщенная проводимость и вязкость технологической среды;  $\sigma_P$  – трансляционная составляющая напряженного состояния технологической среды и сформированного покрытия в направлении силы деформирования  $P$ ;  $\sigma_M$  – ротационная составляющая напряженного состояния в направлении вращения на плоскости, образованной  $\vec{P}$  и  $\vec{V}$ .

Соотношение составляющих напряженного состояния среды  $\sigma_P / \sigma_M$  на микроуровне и скоростей дополнительного и главного движения элементов технологической системы  $S/V$  на макроуровне описывает вязкость технологической среды  $1/\nu^*$ , называемую ротационной [1; 2; 8]:

$$\mu^* = \frac{1}{\nu^*} = \left( \frac{\sigma_M}{\sigma_P} \right) \left( \frac{S}{V} \right).$$

Ротационная вязкость  $\mu^* = -\tau^* / \text{rot } v^*$  характеризует переход объемной вязкости среды  $\zeta^* = -\sigma^* / \text{div } v^*$  в динамическую  $\eta = -\tau^* / \text{div } v$  при интенсификации технологических воздействий, используя добавочные касательные  $\tau^*$  и нормальные  $\sigma^*$  напряжения, при сжатии и растяжении среды наряду с нормальным напряжением давления  $\sigma_g$  и динамическим касательным напряжением  $\nu_g = -\eta \sigma_g$  [1; 2; 8], а  $\nu^*$  описывает турбулентные составляющие вращения в потоке среды, движущейся со скоростью  $V$ .

При образовании термодинамически неустойчивых структур целесообразно критерием Рейнольдса  $Re^*$ , описывающим турбулентность поверхностных течений и потоков обрабатываемого материала, определять волнистость и шероховатость формирующегося рельефа поверхности  $Ra$  [1; 2; 7; 8]. Поэтому толщина формируемого слоя, пропорциональная увеличению или

снижению его массы, с учетом сплошности или пористости покрытия, в результате которых изменяется относительное упрочнение  $H_\epsilon = \Delta H / H$ , описывается выражением  $Q / (1 - H_\epsilon)$ , в котором  $Q$  – коэффициент пропорциональности.

Соотношение параметров напряженного состояния  $\sigma_P / \sigma_M$ , пропорциональных факторам, определяющим перемещение и вращение частиц порошка и вещества деформируемого материала, согласно критериям  $Sm$ ,  $Se$  и  $Sm / Se$ , представляется отношениями:  $B / \tau$  – для магнитодинамических;  $t / I$  – для термодинамических;  $P / I$  – для термодинамических;  $B / E_1$  – для электромагнитных воздействий.

Отношение  $B / E_1$  может быть представлено как  $B / U$  при использовании в качестве источника электрической дуги генераторов импульсов и как  $B / I$  при использовании трансформаторов.

В результате при управлении источниками энергии целесообразно применять соотношения, пропорциональные критериям теплопереноса, для оптимизации геометрических характеристик рельефа поверхности

$$Ra \sim \frac{V_S [Q / (1 - H_\epsilon)]}{(B / I)(V / S)} = \frac{V_S SIQ}{VB(1 - H_\epsilon)} = \frac{\Pi}{(1 - H_\epsilon)}$$

и для оптимизации физико-механических параметров относительного упрочнения материала поверхностного слоя:

$$H_\epsilon \sim 1 - \frac{V_S SIQ}{VBR} = 1 - \frac{\Pi}{Ra}.$$

Эти соотношения показывают положительную обратную связь рельефа  $Ra$  и отрицательную обратную связь упрочнения  $H_\epsilon$  с производительностью обработки  $\Pi = V_S SIQ / VB$ , а также характеризуют кинематику оборудования ( $S / V$ ) и мощности источника энергии ( $I / B$ ) или ( $U / B$ ), если учитывается напряжение.

Организация обратных связей в технологических комплексах термомеханической и электрофизической обработки через избыточные степени свободы инструментов, частиц наносимого материала и удаляемого слоя, а также посредством дополнительных воздействий полями и потоками энергии, позволяет управлять процессами формирования поверхностного слоя.

**Проектирование технологических процессов и оборудования, использующих источники энергии.** Предложенные последовательности критериев переноса (1)–(3) применялись при проектировании процессов и оборудования, использующих традиционные и новые высокоэффективные технологии, в том числе и для аддитивного производства.



Рис. 1. Технологический комплекс плазменного раскроя материала с манипулятором для резки и разделки кромок заготовок под углом

Fig. 1. Technological complex of plasma cutting of material with a manipulator for cutting and cutting edges of workpieces at an angle

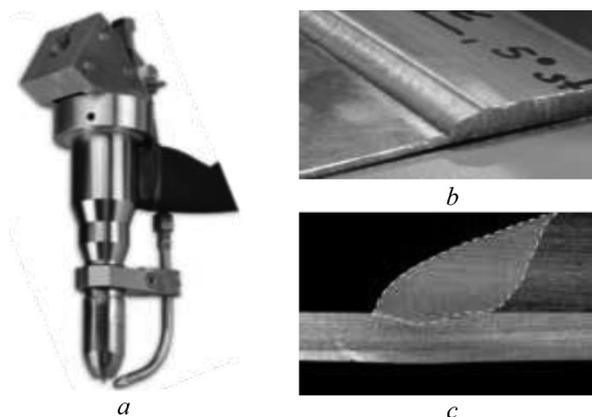


Рис. 2. Оборудование для плазменной сварки: *a* – сварочная головка Kjellberg; *b* – послойная сварка изделия; *c* – сечение сварочного шва (информация с сайта [www.kjellberg.de](http://www.kjellberg.de))

Fig. 2. Plasma welding equipment: *a* – Kjellberg welding head; *b* – layer-by-layer welding of the product; *c* – section of the weld (information from the web page [www.kjellberg.de](http://www.kjellberg.de))



Рис. 3. Технологический комплекс гидроабразивной резки

Fig. 3. Technological complex for waterjet cutting



Рис. 4. Поворотная система сопла гидроабразивной резки

Fig. 4. Rotary waterjet nozzle system

Последовательности критериев тепло- и массопереноса (1) позволили спроектировать раскройное и сварочно-сборочное оборудование, реализующее технологии аддитивного производства при использовании плазменных источников энергии.

Так, на основе целенаправленного выбора критериев переноса, определяющих значимые технологические факторы, и анализа обратных связей по параметрам производительности и качества обработки, в ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси спроектировано плазменное оборудование с пятикоординатным манипулятором для листового раскроя, в том числе с разделкой кромки заготовки под углом по заданному контуру (рис. 1).

Дооснащение технологического комплекса плазменного раскроя материала сварочной головкой дает возможность осуществить послойную сборку и сварку изделия и тем самым реализовать технологию аддитивного производства (рис. 2).

Использование критериев переноса для истечения струи (2) позволило в ОАО «НПО Центр» НАН Беларуси спроектировать оборудование для гидроабразивной резки (рис. 3) и расширить круг его возможностей за счет применения манипулятора для поворотной системы (рис. 4).

Применение последовательности критериев электрофизического взаимодействия (3) и использование модифицированных критериев тепломассопереноса, связывающих соотношения



Рис. 5. Дозирующее устройство с импульсным полюсным наконечником для подачи ферропорошка

Fig. 5. Dosing device with impulse pole piece for feeding ferro-powder



Рис. 6. Импульсный полюсный наконечник с образовавшимися в электромагнитном поле цепочками ферропорошка

Fig. 6. Pulsed pole piece with chains of ferro-powder formed under the action of an electromagnetic field

составляющих напряженного состояния среды  $\sigma_P / \sigma_M$  на микроуровне и скоростей дополнительного и главного движения элементов системы  $S / V$  на макроуровне, дало возможность спроектировать оборудование для магнито-абразивной обработки и электромагнитной наплавки сложнопрофильных поверхностей в ферропорошковой среде, управляемой электромагнитным полем (рис. 5).

Такое оборудование позволяет как обрабатывать, так и упрочнять сложнопрофильные поверхности изделий в аддитивном производстве, сглаживая абразивной обработкой или заполнением расплавом порошка, образованные при послойном синтезе ступеньки (рис. 6).

**Закключение.** Моделирование совместных термомеханических и электромагнитных воздействий при проектировании технологических процессов и оборудования базируется на критериях тепло- и массопереноса, электро- и физико-химического взаимодействия, определяет основные управляющие технологические факторы и связывает оптимизируемые геометрические и физико-механические параметры качества с производительностью обработки.

Обеспечение требуемых условий формирования поверхностного слоя изделий, согласно критериям переноса в открытых технологических системах при совместных воздействиях, позволяет посредством организации обратных связей в электрофизических и термомеханических процессах управлять эффективностью и качеством обработки.

### Список использованных источников

1. Хейфец, М. Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М. Л. Хейфец. – М., 2005. – 272 с.
2. Технологические основы управления качеством машин / А. С. Васильев [и др.]. – М., 2003. – 256 с.
3. Анализ свойств отношений технологических решений при проектировании комбинированных методов обработки материалов / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2001. – Т. 45, № 4. – С. 106–109.
4. Использование критериев подобия для комбинированных физико-химических методов обработки материалов / А. И. Гордиенко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2004. – Т. 48, № 4. – С. 107–110.
5. Проектирование технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий на основе многофакторной оптимизации / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 1997. – Т. 41, № 3. – С. 112–118.
6. Проектирование мехатронных технологических комплексов высокоэффективной обработки изделий / П. И. Ящерицын [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2003. – Т. 47, № 6. – С. 120–124.
7. Хейфец, М. Л. Проектирование мехатронных технологических комплексов для традиционного и аддитивного производства / М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 6. – С. 739–746. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>
8. Теоретические основы проектирования технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2012. – 239 с.
9. Конструирование и оснащение технологических комплексов / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2014. – 316 с.
10. Автоматизация и управление в технологических комплексах / А. М. Русецкий [и др.]; под общ. ред. А. М. Русецкого. – Минск, 2014. – 375 с.
11. Обеспечение качества изделий в технологических комплексах / С. А. Чижик [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца. – Минск, 2019. – 248 с.
12. Исследование микро- и наногометрии поверхности полиметилметакрилата, обработанной водно-капельной струей / А. И. Свириденко [и др.] // Трение и износ. – 2003. – Т. 24, № 2. – С. 186–191.
13. Микро- и наногометрия и физико-механические свойства эродированных поверхностей полиметилметакрилата / А. И. Свириденко [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2004. – Т. 48, № 2. – С. 98–102.
14. Телегин, А. С. Тепломассоперенос / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. – М., 1995. – 400 с.
15. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент / под ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. – М., 1988. – 560 с.

### References

1. Kheifetz M. L. *Design process of combined processing*. Moscow, 2005. 272 p. (in Russian).
2. Vasil'ev A. S., Dal'sky A. M., Klimenko S. A., Polonsky L. G., Kheifetz M. L., Yashcheritsyn P. I. *Technological fundamentals of machine quality management*. Moscow, 2003. 256 p. (in Russian).
3. Yashcheritsyn P. I., Averchenkov V. I., Kheifetz M. L., Kukhta S. V. Analysis of the properties of ratios of technological solutions in designing combined methods of the treatment of materials. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2001, vol. 45, no. 3, pp. 106–109 (in Russian).
4. Gordienko A. I., Kozhuro L. M., Kheifetz M. L., Kukhta S. V. Use of analogy parameters for development of combined physical-chemical material processing methods. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2004, vol. 48, no. 4, pp. 107–110 (in Russian).

5. Yashcheritsyn P. I., Kheifets M. L., Kozhuro L. M., Chemisov B. P. Designing technological complexes of high-effective treatment of products on the basis of products multifactorial optimization. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 1997, vol. 41, no. 3, pp. 112–118 (in Russian).
6. Yashcheritsyn P. I., Kheifets M. L., Zeveleva E. Z., Akulovich L. M. Designing of mechatronic technological complexes of high-performance processing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2003, vol. 47, no. 6, pp. 120–124 (in Russian).
7. Kheifetz M. L. Design of mechatronic technological complexes for traditional and additive manufacturing. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 6, pp. 739–746 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-6-739-746>
8. Rusetsky A. M., Vityaz' P. A., Kheifets M. L., Averchenkov V. I., Akulovich L. M. *Theoretical bases of technological systems designing*. Minsk, 2012. 239 p. (in Russian).
9. Rusetsky A. M., Vityaz' P. A., Kheifets M. L., Danilov V. A., Kiselev R. A., Krut'ko V. S., Popok N. N., Klimenko S. A. *Design and equipment of technological systems*. Minsk, 2014. 316 p. (in Russian).
10. Rusetsky A. M., Averchenkov A. V., Averchenkov V. I., Akulovich L. M., Barashko O. G., Vityaz' P. A., Kashtal'yan I. A., Pyn'kin A. M., Rodionova O. L., Svirskii D. N., Terekhov M. V., Kheifets M. L., Sheleg V. K. *Automation and control in technological complexes*. Minsk, 2014. 375 p. (in Russian).
11. Chizhik S. A., Vityaz' P. A., Kheifets M. L., Borodavko V. I., Prement G. B. *Ensuring the quality of products in technological complexes*. Minsk, 2019. 248 p. (in Russian).
12. Sviridenok A. I., Ignatovsky M. I., Sveklo I. Ph., Louis H., Stavrov V. P. Investigation of micro- and nano-geometry of the surface of polymethyl methacrylate treated with a water-drop jet. *Trenie i iznos = Friction and Wear*, 2003, vol. 24, no. 2, pp. 186–191 (in Russian).
13. Sviridenok A. I., Chizhik S. A., Louis H., Ignatovsky M. I. Micro- and nanogeometry and physicomechanical properties of eroded surfaces of polymethyl methacrylate. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2004, vol. 48, no. 2, pp. 98–102 (in Russian).
14. Telegin A. S., Shvydkiy V. S., Yaroshenko Yu. G. *Heat and mass transfer*. Moscow, 1995. 400 p. (in Russian).
15. Grigoriev V. A., Zorin V. M., eds. *Theoretical foundations of heat engineering. Heat engineering experiment*. Moscow, 1988. 560 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Хейфец Михаил Львович* – д-р техн. наук, профессор, директор. Институт прикладной физики НАН Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mlk-z@mail.ru.

*Крутко Вячеслав Сергеевич* – начальник управления науки и инновационного развития. НПО «Центр» НАН Беларуси (ул. Шаранговича, 19, 220018, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vkrutko@npo-center.com.

*Грецкий Николай Леонидович* – начальник отдела сопровождения программ и проектов. НПО «Центр» НАН Беларуси (ул. Шаранговича, 19, 220018, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ngretskiy@npo-center.com.

### Information about the authors

*Kheifetz Mikhail L.* – D. Sc. (Engineering), Professor, Director. Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic Belarus). E-mail: mlk-z@mail.ru.

*Krutko Vyacheslav S.* – Head of Science and Innovative Development Department. JSC «NPO Center» of the National Academy of Sciences of Belarus (19, Sharangovich Str., 220018, Minsk, Republic Belarus). E-mail: vkrutko@npo-center.com.

*Gretskiy Nikolay L.* – Head of Programs and Projects Support Department. JSC «NPO Center» of the National Academy of Sciences of Belarus (19, Sharangovich Str., 220018, Minsk, Republic Belarus). E-mail: ngretskiy@npo-center.com.